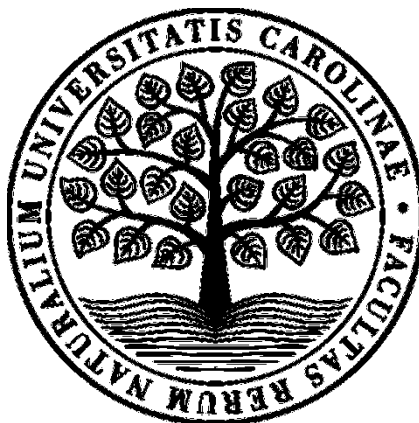


UNIVERZITA KARLOVA  
Přírodovědecká fakulta  
katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie  
Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Milan Mík

Geografická charakteristika extrémních propadů růstu borovice lesní ve střední Evropě

Geographical characteristics of extreme growth depressions of Scots pine in Central  
Europe

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Václav Tremel, Ph.D.

Praha 2020

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 14. srpna 2020

.....

Milan Mík

*Tuto práci věnuji svému otci. Taťko, díky za všechno!*

## **Poděkování**

Především bych chtěl poděkovat doc. Václavu Tremlovi, Ph.D. za množství času a energie, které mi v průběhu celého zpracování práce věnoval. Bez jeho odborného vedení a rad bych práci jen těžko vypracoval. Rozhodně ne v podobě, ve které je předkládána. O to více si cením a vážím v kontextu vysoké odbornosti jeho přátelského přístupu a velmi rychlých reakcí na mé neustálé dotazy a podněty. Taktéž děkuji za komplexní zaučení v dendrochronologické praxi – od odběru vzorků v terénu přes laboratorní práce až po tvorbu statistických dat a jejich zpracování. V této souvislosti chci také zmínit a vyjádřit díky za péči a pomoc při výjezdu na lokalitu *ADR*, kde jsem si při sestupu ke zkoumanému porostu poranil chodidlo. Vašku, děkuji za odvezení do nemocnice a mrzí mě, že Ti celý odběr v terénu tenkrát zůstal na hrbu.

Velké díky patří i dalším členům dendrochronologické laboratoře PřF UK. Konkrétně RNDr. Janu Tumajerovi, Ph.D. zejména za jeho ochotu a trpělivost s osvěžováním zapomenutých, a hlavně učení nových dovedností v oblasti statistiky v prostředí R. Mgr. Jiřímu Maškovi chci poděkovat za všechny velké i malé rady a společné neformální diskuse o tématu a také veškeré bleskové odpovědi na mé rozličné dotazy, ať už v terénu, laboratoři či při samotném psaní práce.

Upřímné a obrovské díky za celoživotní materiální, finanční a psychickou podporu patří celé mé rodině, zejména rodičům a sourozencům. Bez této celoživotní opory a zázemí bych se nebyl schopný dostat do současné pozice, kdy níže předkládám vypracovanou diplomovou práci.

Svůj vděk chci vyjádřit také své přítelkyni Tetianě, která v dlouhých měsících mé soustavné práce nejen respektovala mou zaneprázdněnost, ale taktéž mi aktivně tvořila co nejpřívětivější domácí pracovní podmínky.

V poslední řadě chci vyjádřit vděk všem přátelům, kteří mě ve vytvoření diplomové práce taktéž podporovali.

## Abstrakt

Předložená diplomová práce zkoumá extrémní propady růstu borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) ve střední Evropě. Studium významných negativních růstových anomálií (pointer years) je skrze vztah klima–růst jednou z metod zkoumání reakcí lesních porostů na probíhající klimatickou změnu. Dendrochronologická data pocházejí z Česka (23 lokalit) a Slovenska (4 lokality). Hlavní hypotézou diplomové práce bylo, že projevy extrémních růstových let odpovídají klimatickým anomáliím a mohou tak být vysvětleny geograficky. Mezi cíle patřilo 1) vytvořit pro každou z lokalit chronologii Cropperových hodnot popisující extrémní snížení růstu; 2) vysvětlit klimatické příčiny negativních Cropperových hodnot pro jednotlivé lokality; 3) určit geografické zákonitosti rozložení extrémních snížení růstu; 4) prostorově interpolovat extrémní snížení růstu.

Výpočet Cropperových hodnot byl založen na metodě normalizace v plovoucím okně při zvolení délky okna 13 let na detrendovaných dendrochronologických datech 50letým kubickým splinem. Vytvořené chronologie byly korelovány s měsíčními klimatickými daty (teploty, srážky, SPEI). Dále byly určeny geografické zákonitosti rozložení propadů růstu pomocí hierarchické klastrové analýzy. Současně byly lokality klastrovány i v 17 nejextrémnějších růstových letech, které byly zároveň označeny jako pointer years. Pomocí lineárního modelu byly Cropperovy hodnoty v 98 negativních letech regresně vysvětlovány severností, východností, nadmořskou výškou a produktivitou prostředí. Vybrané extrémní roky pak byly v rámci zájmového území prostorově interpolovány.

Délka chronologií Cropperových hodnot nabývala od 104 do 315 let, přičemž hlavní zkoumané období proložené alespoň 10 lokalitami trvalo 172 let (1841–2012). Mezi nejextrémnější roky patřily 1976, 1956, 1877, 1923 a 1964. Růstové propady korelovaly nejvíce s chodem srážek a SPEI v létě daného i předcházejícího roku výskytu propadu, dále pak s teplotou v únoru daného roku. Rozložení propadů růstu v rámci období 1902–2004 (proložené daty ze všech lokalit) bylo rozděleno do 4 geografických tříd (jihovýchodní, západní, severní, centrální). Regresním modelem bylo uspokojivě vysvětleno (adjustovaný koeficient determinace  $\geq 0,4$ ,  $p$  hodnota  $\leq 0,001$ ) 25 let, z nichž 22 (po vypuštění regresoru produktivity) bylo prostorově interpolováno, čímž vznikly mapy klimatického signálu propadů růstu. Nejextrémnějšími prostorově interpolovanými roky byly 1877, 1904, 1922, 1923 a 2006. Nejvýznamnějšími regresory byla severnost a východnost, což nejspíše souvisí s vlivem chodu synoptických typů počasí na propady v růstu.

**Klíčová slova:** propady růstu, Cropperovy hodnoty, pointer years, borovice lesní, střední Evropa

## Abstract

The presented diploma thesis studies extreme growth depressions of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Central Europe. Examination of significant growth anomalies (pointer year analysis) is one of the methods, which investigates the reactions of forest stands to the ongoing climate change. Dendrochronological data was obtained from Czechia (23 sites) and Slovakia (4 sites). The main hypotheses of the thesis states that the extreme growth depressions relate to climatic anomalies, hence they can be explained geographically. The objectives were to 1) create a Cropper values chronology for each site which describes extreme growth depressions; 2) explain climatic causes of negative Cropper values for each site; 3) define geographical predispositions of a spatial distribution of extreme growth depressions; 4) spatially interpolate extreme growth years.

The calculation of Cropper values was based on a normalisation in a moving window method with a 13-year window size and the input data detrended by a 50-year cubic smoothing spline. Created chronologies were correlated with monthly climate data (temperatures, precipitation, SPEI). Geographical predispositions of the spatial distribution of growth depressions were calculated using a hierarchical cluster analysis. The cluster analysis was also applied to the most extreme 17 growth years, which were defined as pointers. Regression model served as a tool to explain spatial distribution of the Cropper values in 98 negative years. The predictors were latitudinal position (northern gradient), longitudinal position (eastern gradient), altitude and site productivity. Chosen extreme years were spatially interpolated within the study area.

The chronology lengths varied from 104 to 315 years. The main study period spanned over 172 years (1841—2012). The most extreme pointer years were assessed in 1976, 1956, 1877, 1923 and 1964. Growth depressions correlated the most with precipitation and SPEI in the summer of both the preceding and given year and with the February temperature in the given year. The distribution of growth depressions in the period 1902—2004 (available data for all sites) was divided into 4 geographical classes (Southeast, West, North, Central). Regression model sufficiently explained (adjusted R-square  $\geq 0.4$ ,  $p$ -value  $\leq 0.001$ ) 25 years, which of 22 were spatially interpolated into maps (after exclusion of the site productivity predictor). The most extreme spatially interpolated pointer years were 1877, 1904, 1922, 1923 and 2006. The most significant predictors were latitudinal and longitudinal positions, which most likely link to a relationship between growth depression and a large scale weather regime types occurrence.

**Key words:** growth depressions, Cropper values, pointer years, Scots pine, Central Europe

# OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. RŮST STROMŮ A VLIV KLIMATU .....</b>	<b>13</b>
2.1. <i>Radiální růst stromů .....</i>	13
2.1.1. Fyziologie a morfologie dřeva.....	13
2.1.2. Dřevo jehličnatých vs. listnatých stromů .....	15
2.2. <i>Vliv klimatu na růst stromů .....</i>	17
2.2.1. Cookův model.....	17
2.2.2. Chybějící a falešné letokruhy .....	19
2.2.3. Princip limitujících faktorů.....	20
2.2.4. Ostatní faktory ovlivňující šířku letokruhů.....	21
<b>3. EXTRÉMNÍ RŮST STROMŮ .....</b>	<b>22</b>
3.1. <i>Reakce stromů na extrémní události .....</i>	22
3.1.1. Mechanický stres .....	22
3.1.2. Klimatický stres.....	22
3.2. <i>Hodnocení extremity klimatu pomocí pointer years .....</i>	25
3.2.1. Statistické přístupy stanovení pointer years .....	26
3.3. <i>Evidence extrémních snížení růstu ve střední Evropě .....</i>	30
<b>4. CHARAKTERISTIKA BOROVICE LESNÍ (PISY).....</b>	<b>33</b>
<b>5. FYZICKOGEOGRAFICKÝ POPIS LOKALIT .....</b>	<b>35</b>
5.1. <i>Pluhův bor .....</i>	35
5.2. <i>Rabštejn nad Střelou .....</i>	37
5.3. <i>Březník.....</i>	37
5.4. <i>Prácheň.....</i>	38
5.5. <i>Zbečno .....</i>	38
5.6. <i>Dívčí kámen .....</i>	39
5.7. <i>České Švýcarsko.....</i>	40
5.8. <i>Kokořínsko .....</i>	41
5.9. <i>Adršpach.....</i>	41
5.10. <i>Suchý vrch.....</i>	42
5.11. <i>Velká Fatra .....</i>	43
5.12. <i>Slovenský ráj.....</i>	43

<b>6.</b>	<b>MATERIÁL A METODIKA .....</b>	<b>45</b>
6.1.	<i>Dendrochronologická data .....</i>	45
6.1.1.	Primární data .....	45
6.1.2.	Odběr vzorků .....	45
6.1.3.	Příprava vzorků .....	47
6.1.4.	Měření a analýza šířek letokruhů .....	48
6.2.	<i>Klimatická data.....</i>	49
6.2.1.	Česko .....	49
6.2.2.	Slovensko .....	50
6.3.	<i>Analýza extrémních propadů růstu .....</i>	51
6.3.1.	Chronologie Cropperových hodnot .....	51
6.3.2.	Dendroklimatická analýza.....	51
6.3.3.	Klastrová analýza .....	52
6.3.4.	Regresní analýza .....	53
<b>7.</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>55</b>
7.1.	<i>Základní charakteristika dendrochronologických dat .....</i>	55
7.2.	<i>Chronologie Cropperových hodnot.....</i>	56
7.3.	<i>Dendroklimatická analýza .....</i>	58
7.3.1.	Korelace Cropperových hodnot s klimatem .....	58
7.3.2.	Chod klimatu v nejextrémnějších růstových letech.....	61
7.4.	<i>Klastrová analýza .....</i>	62
7.5.	<i>Faktory vysvětlující prostorové rozšíření extrémních roků .....</i>	64
7.6.	<i>Geografické rozložení extrémních propadů růstu.....</i>	66
<b>8.</b>	<b>DISKUSE .....</b>	<b>74</b>
8.1.	<i>Chronologie Cropperových hodnot a identifikace pointer years .....</i>	74
8.2.	<i>Vysvětlení klimatických příčin negativních Cropperových hodnot.....</i>	75
8.3.	<i>Určení geografických zákonitostí rozložení extrémních snížení růstu .....</i>	76
8.3.1.	Nevysvětlené roky .....	78
8.4.	<i>Nejistoty spojené s použitou metodikou a interpretací výsledků .....</i>	78
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>81</b>
<b>10.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>82</b>
10.1.	<i>Literatura.....</i>	82
10.2.	<i>Datové, mapové, internetové a jiné zdroje.....</i>	93
<b>+</b>	<b>PŘÍLOHY</b>	

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Části kmene na jeho příčném řezu.....	14
Obrázek 2: Mikroskopické schéma stavby dřeva jehličnanů. ....	16
Obrázek 3: Mikroskopické schéma stavby dřeva listnáčů. ....	17
Obrázek 4: Princip limitujících faktorů růstu.....	20
Obrázek 5: Příklady negativních (vlevo) a pozitivních (vpravo) event years.....	25
Obrázek 6: Vývoj počtu negativních PYs ve střední Evropě mezi roky 1841–2012.....	30
Obrázek 7: Současné rozšíření PISY a její přirozený areál výskytu.....	34
Obrázek 8: Zájmové území s vyznačenými výzkumnými lokalitami. ....	36
Obrázek 9: Ukázka odběru vzorku v terénu přírůstovým nebozezem. ....	46
Obrázek 10: Desky pro přepravu vzorků a notes s DBH a dalšími poznámkami.....	47
Obrázek 11: Lepení vzorků do lišt a jejich fixace kovovými klipy. ....	48
Obrázek 12: Příklad měření šířek letokruhů v programu WinDENRO. ....	49
Obrázek 13: Chronologie mediánu C values zkoumaných lokalit.....	57
Obrázek 14: Pearsonovy korelační koeficienty mezi chronologiemi C values a klimatickými proměnnými (teplotou, srážkami a SPEI) v období 1901–2019. ....	60
Obrázek 15: Dendrogram vzniklý hierarchickou klastrovou analýzou mediánů C values zkoumaných lokalit v období 1902–2004. ....	62
Obrázek 16: Mapa zájmového území s lokalitami rozdělenými dle příslušnosti k jednotlivým klastrům. ....	63
Obrázek 17: Vývoj počtu negativních PYs ve střední Evropě mezi roky 1841–2012 s vyznačenými PYs detekovaných v této DP. ....	75

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled lokalit se souřadnicemi a údaji o sběru a zpracování dat. ....	46
Tabulka 2: Přehled základních údajů o letokruhových sériích na úrovni lokalit. ....	55
Tabulka 3: Vybrané souhrnné údaje jednotlivých chronologií C values.....	58
Tabulka 4: Výsledky regresního modelu pro extrémní roky v období 1841–2012. ....	65

## Seznam rovnic

Rovnice 1: Cookův lineární model. ....	18
Rovnice 2: Výpočet růstového trendu jedince.....	26
Rovnice 3: Výpočet intervalového trendu v rámci porostu. ....	27
Rovnice 4: Výpočet relativní změny růstu.....	27
Rovnice 5: Výpočet C value. ....	28
Rovnice 6: Výpočet z-transformované chronologie.....	29
Rovnice 7: Výpočet srážek pro slovenské lokality mezi 1901–1951 škálováním.....	51



## Seznam použitých zkratk

C .....	uhlík
C values .....	Cropperovy hodnoty
CRU .....	Climatic Research Unit
ČHMÚ .....	Český hydrometeorologický ústav
DBH .....	průměr v prsní výšce (diameter at breast height)
DP .....	diplomová práce
DPI .....	počet bodů na palec (dots per inch)
EPS .....	vyjádřený populační signál (expressed popupation signal)
FAO .....	Organizace pro výživu a zemědělství
FG .....	fyzickogeografický, fyzická geografie
FLD ČZU .....	Fakulta lesnická a dřevařská České zemědělské univerzity v Praze
GAČR .....	Grantová agentura České republiky
GPS .....	Globální polohový systém (Global Positioning System)
CHKO .....	Chráněná krajinná oblast
J .....	jižní, jih
KFGG .....	katedra fyzické geografie a geoekologie
NP .....	Národní park
NPR .....	Národní přírodní rezervace
PDSI .....	Palmerův index intenzity sucha
PISY .....	<i>Pinus sylvestris</i> L. (borovice lesní)
PR .....	přírodní rezervace
PřF UK .....	Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
PY(s) .....	pointer year(s)
S .....	severní, sever
SPEI .....	standardizovaný srážkový evapotranspirační index
s. š. ....	severní šířka
V .....	východní, východ
v. d. ....	východní délka
Z .....	západní, západ

# 1. ÚVOD

Tato práce se prostřednictvím zkoumání růstu borovice lesní (*Pinus sylvestris*) zabývá lesy. Ty lze dle [FAO \(2018, s. 4\)](#) definovat jako „plochu větší než 0,5 ha, na které se vyskytují stromy vyšší než 5 m a korunový zápoj je větší než 10 %“. První porosty splňující tato kritéria se na Zemi patrně začaly vyvíjet v období Křídy, tj. 363–290 milionů let před současností ([Schweingruber a kol. 2008](#)). Stromy, jakožto základní stavební jednotka lesů, pokrývají dle [Lathama a kol. \(2014\)](#) přibližně 27,7 % globální pevniny, nepočítaje Antarktidu (většina vstupních dat pochází z let 2000–2012). Výpočty jiných autorů se liší v jednotkách procent (většinou jsou výsledky vyšší), například [FAO \(2016\)](#) uvádí 30,6% pokrytí v roce 2015. Tak či onak lesy tvoří nejrozšířenější typ krajinného pokryvu na Zemi. I díky svému prostorovému rozsahu a evolučnímu stáří tak dnes hrají (nejen v globálním měřítku) nezastupitelnou roli.

Výčet benefitů lesa je téměř bezbřehý. Stupeň důležitosti každé z jeho funkcí se liší v prostoru a čase, současně velmi záleží na uvažovaném měřítku. Perspektivou ekosystémových služeb (sensu [Watson a kol. 2005](#)) patří z globálního pohledu mezi nejdůležitější role lesa následující:

**Zásobovací funkce:** les slouží jako částečný či úplný zdroj obživy pro 1–1,6 miliardy lidí zahrnující produkci potravin, paliva či stavebního materiálu ([Agrawal a kol. 2013](#)). Dále jako částečný či úplný zdroj pitné vody pro 4,6 miliardy lidí ([Watson a kol. 2005](#)).

**Regulační funkce:** lesy obsahují zhruba 80 % veškerého uhlíku (C) uloženého v nadzemní a 40 % v podzemní pevninské biomase ([Kirschbaum 1996](#) cit. v [Gaudel a kol. 2016](#)), což v absolutních číslech znamená zhruba  $300 \times 10^{15}$  g. V porovnání s množstvím C obsaženým v atmosféře (cca  $750 \times 10^{15}$  g) je ho tak v lesích 2,5krát méně ([Carlson a kol. 2001](#)). To z nich činí důležitou proměnnou v globálním cyklu C. Vedle toho lesy regulují koloběh vody. [Watson a kol. \(2005\)](#) uvádí, že ovlivňují 57 % celosvětového odtoku. Pozitivně působí i na kvalitu vzduchu, a to zejména lokálně v hustě zalidněných oblastech, kde znečištění vzduchu dosahuje nejvyšších hodnot. Například [Nowak, Crane \(2000\)](#) odhadují, že v roce 1994 ve městě New York City stromy snížily množství polutantů ve vzduchu o 1821 tun. V podobných prostředích je též významný pozitivní vliv vegetace – v čele se stromy – na mikroklima. Například [Dimoudi, Nikolopoulou \(2003\)](#) uvádí, že při referenční teplotě městského prostředí 25 °C lze očekávat teplotu v parku s rozlohou 100 m<sup>2</sup> o 1 °C nižší vůči svému zastavěnému okolí (navíc lze tento vztah do rozlohy parku při nejmenším 350 m<sup>2</sup> lineárně prodloužit). Lesní

porosty taktéž zmírňují průběh a následky ohrožení jako jsou třeba povodně či sucha. V neposlední řadě přispívají k prevenci eroze půdy (FAO 2018).

*Kulturní funkce:* lesy slouží například k rekreaci, výchově a vzdělávání, spirituálním, duchovním či jiným potřebám člověka (Watson a kol. 2005).

*Podpůrné funkce:* tato kategorie služeb zajišťuje produkci benefitů z předchozích tříd. Některé z již zmíněných přínosů (jako například prevence erozního ohrožení) patří taktéž mezi funkce podpůrné. Dále sem lze zařadit cyklus vody, C a dalších pro život důležitých prvků (Watson a kol. 2005), na kterých se lesy významně podílí.

Mezi další důležité role lesních porostů bezesporu patří poskytování habitatu organismům, které se v nich přirozeně vyskytují. Jejich úloha je klíčová – tak třeba tropické lesní ekosystémy poskytují útočiště nejméně dvěma třetinám všech suchozemských organismů (Gardner a kol. 2009).

Již ze stručného výčtu výše je logické, že se lidská společnost lesy (potažmo stromy) snaží chránit. V současnosti je pod různým stupněm ochrany 17 % rozlohy všech lesů (FAO 2018). Vývoj jejich rozlohy, distribuce a složení je velmi dynamický, a to jak v poslední době, tak z pohledu historického. Tyto parametry jsou předurčeny kvartérním střídáním glaciálů a interglaciálů. I ty nejstarší současné lesní systémy na Zemi jsou až na výjimky (např. tropické deštné lesy) holocenního stáří, kdy jen ojediněle přesahují stáří 10 000 let (Jackson 2006). Většina jich je však mladších, a to i mnohonásobně (Bradshaw a kol. 2015, Birks, Tinner 2016).

Lesy se tedy kontinuálně vyvíjejí a přizpůsobují se podmínkám prostředí jejich výskytu. Ty se neustále přirozeně mění (Jackson 2006), nicméně tyto změny jsou více a více ovlivňovány činností člověka. Předpokládá se, že pokračující rychlé environmentální změny, které v současnosti probíhají, učiní mnoho konzervačních aktivit neudržitelnými (Tinner, Ammann 2005). Mezi zásadní faktory ovlivňující vývoj prostředí jako celku (tedy i vegetační kryt a celou biosféru), patří klima (Štěpánek a kol. 2019). V našem středoevropském prostoru, kterému se tato práce věnuje, se největší změny klimatu očekávají v rostoucích teplotách. V závislosti na vstupním scénáři je možné čekat nárůst průměrných teplot do konce 21. století až o 6 °C, pravděpodobně však o 2–3 °C oproti konci 20. století. Modelování srážek je nejisté. Je možné, že se změní jejich distribuce v průběhu roku, nicméně u celkových úhrnů se neočekávají výrazné změny oproti současnosti (Štěpánek a kol. 2019). Vyšší teploty v kombinaci se stejnými úhrny srážek tak povedou k vyšší míře evapotranspirace a běžnějším výskytům sucha. Navíc celý klimatický systém bude méně stabilní, což mimo jiné povede k častějším extrémním

projevům počasí. To dokazuje například predikce nárustu počtu dní v roce se srážkami 20 mm a více ([Štěpánek a kol. 2019](#)).

Se všemi těmito následky se budou muset vyrovnat společnost i krajina, lesy nevyjímaje. Tato diplomová práce (DP) se proto prostřednictvím zkoumání letokruhů zaměřuje na extrémní propady růstu borovice lesní (PISY). Hlavní hypotézou je, že projevy extrémních let odpovídají klimatickým anomáliím a mohou tak být vysvětleny geograficky. Výsledky DP by mohly napomoci lépe porozumět příčinám, které vedou k extrémním růstovým propadům. Takové poznání může nejen zlepšit rekonstrukci klimatu v období před nástupem systematického měření chodu meteorologických prvků – v Česku dle [ČHMÚ \(2020a\)](#) začalo pravidelné měření v pražském Klementinu v roce 1752, avšak o výrazně hustší síti stanic lze hovořit nedříve ve 2. polovině 19. století ([Gregor 1965](#)). Celkově nabyté poznatky mohou taktéž pomoci lépe predikovat, jak budou v budoucnu borové porosty ve střední Evropě reagovat na probíhající změny klimatu, což je zásadní pro ochranu lesů, jejich management a roli v cyklu C.

Hlavními cíli práce jsou:

1. Vytvoření chronologií extrémních snížení růstu (tzv. *Cropperových hodnot*) pro každou z 27 lokalit.
2. Vysvětlení klimatických příčin negativních Cropperových hodnot pro jednotlivé lokality.
3. Určení geografických zákonitostí rozložení extrémních snížení růstu.
4. Prostorově interpolovat extrémní snížení růstu.

## 2. RŮST STROMŮ A VLIV KLIMATU

### 2.1. Radiální růst stromů

Původ výrazu dendrochronologie pochází z řečtiny (Fritts 1976). Jedná se o složeninu slov „dendron“, „chrónos“ a „logia“. Českými slovy tedy „strom“, „čas“ a (v daném kontextu) „věda“. V nejobecnější rovině lze říci, že se dendrochronologie zabývá studiem letokruhů. Na základě jejich vlastností, nejčastěji šířky, studuje variabilitu prostředí a s přesností na jeden rok dokáže datovat nejrůznější události, které ovlivňují růst stromů (Speer 2010).

Tvorba letokruhů je výsledkem radiálního růstu dřevin v oblastech, kde se mění sezonalita (střídá se vegetační sezona a vegetační klid) v rámci roku (Kyncl 2017). Dendrochronologie se nejvíce uplatňuje v temperátní a boreální zóně. Avšak už od 80. let 20. století se objevují dendrochronologické práce z tropických oblastí. Současná věda si tak už neklade otázku, zda stromy v tropech letokruhy tvoří, nýbrž jaké všechny druhy tak činí (Fontana 2019). Dendrochronologické metody se ale prosazují i ve vysokých zeměpisných šířkách za polární hranicí lesa. Objektem studia meziročních rozdílů v růstu jsou zde různé zakrslé formy dřevin, nejčastěji keře (Myers-Smith a kol. 2015, Owczarek, Opała 2016).

Pro pochopení vztahu mezi faktory prostředí (např. klimatem) a tvorbou letokruhů je nejdříve třeba popsat samotnou fyziologickou a zejména morfologickou složku dřeva. Bez znalosti jak, kde a kdy stromy rostou by bylo totiž obtížné popisovat vliv proměnlivosti klimatu na výslednou šířku letokruhů (Fritts 1976).

#### 2.1.1. Fyziologie a morfologie dřeva

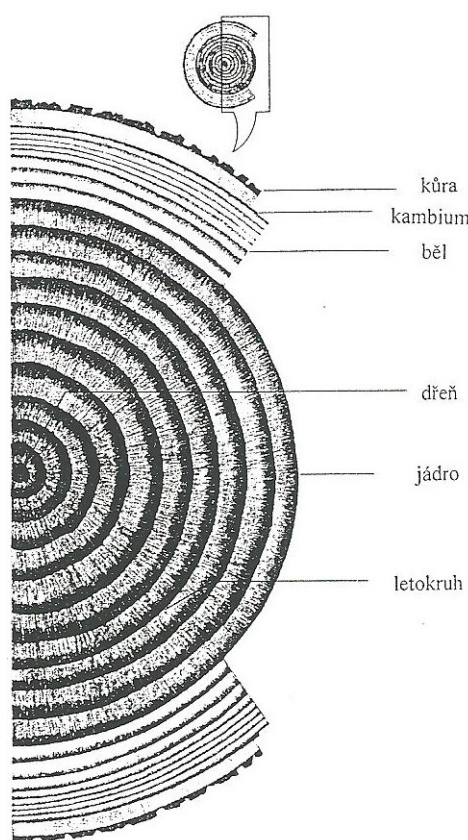
Dřeviny se vyznačují tím, že jsou formovány převážně dřevem, tedy souborem rostlinných buněk, jejichž většina má zdřevnatělé (*lignifikované*) stěny. Další popis se omezuje na stromy, tedy „*dřeviny vyššího až vysokého vzrůstu s nerozvětvenou hlavní osou a rozvětvenými postranními osami tvořícími korunu*“ (Šlezingerová, Gandelová 2002, s. 9). Jejich těla se dělí na kořeny, centrální kmen a korunu. Další tuzemské dřeviny, keře a polokeře (Šlezingerová, Gandelová 2002), nejsou předmětem této DP.

Stromy lze rozdělit na dvě hlavní evoluční skupiny – jehličnany a listnáče. Jehličnaté stromy (nahosemenné rostliny) se postupně vyvíjí od období Jury (cca 200 až 150 mil. let před současností) a jsou vývojově starší. Evolučně mladší listnáče, spadající pod

dvouděložné krytosemenné rostliny, mají komplikovanější anatomickou stavbu a také jsou druhově bohatší ([Schweingruber a kol. 2008](#)).

Pro obě skupiny platí to, že radiální růst (někdy také sekundární či druhotné tloušťnutí) jejich zástupců zajišťují buňky vaskulárního (cévního) *kambia* ([Šilhán 2013](#)). Jedná se o sekundární dělivé pletivo, které se dělí do dvou směrů. K *medulle*, tj. dřeni (středu kmene) produkuje sekundární *xylém*, tj. dřevo, směrem vně sekundární *floém*, tj. lýko ([Procházka a kol. 1994](#)). Hlavní úloha xylému je mechanická opora. Společně s floémem plní i vodivou funkci, kdy xylém vede primárně vodu a floém živiny ([Fritts 1976](#)). Aktivita kambia je řízena interakcí komplexu stimulačních rostlinných hormonů, zejména *auxinem*. Ten se tvoří v průběhu vegetačního období v oblasti vzrostného vrcholu. Jeho množství záleží na vnějších podmínkách ([Speer 2010](#)), více viz kapitola 2.2. Hlavní funkce lýka je vedení asimilátů vytvořených fotosyntézou. Vnější vrstva kůry se nazývá *periderm* a vzniká činností dalšího dělivého pletiva, *felogénu*. Úkolem peridermu je chránit a izolovat vnitřní část stromu ([Šlezingerová, Gandelová 2002](#)). Schéma příčného řezu kmenem s jeho jednotlivými složkami je na obrázku 1 níže.

**Obrázek 1:** Části kmene na jeho příčném řezu.



**Zdroj:** [Hoadley 1990](#) cit. v [Šlezingerová, Gandelová 2002](#)

Z obrázku 1 výše ještě nebyly popsány jádro a běl. Jedná se o složky dřeva, které se liší jak makroskopicky, tak fyziologicky. Běl (zpravidla světlejší) zastává zásobní a vodivou funkci, kdy jsou jím od kořenů ke koruně vedeny minerální látky. To je příčinou souvislosti mezi jeho šířkou a plochou olistění stromu (např. [Waring a kol. 1982](#)). S časem se vnitřní část běle postupně přeměňuje na jádro. To je fyziologicky neaktivní a plní tak pouze funkci opornou. Šířka, respektive poměr obou složek se liší v závislosti na druhu stromu a velikosti koruny (ta může souviset s vlivem kompetice) a svou roli může hrát i věk jedince. Obecně lze říci, že šířka běle klesá s narůstajícím věkem a stupněm kompetice ([Desch, Dinwoodie 1996](#)), více podrobností v kapitole 2.2.1.

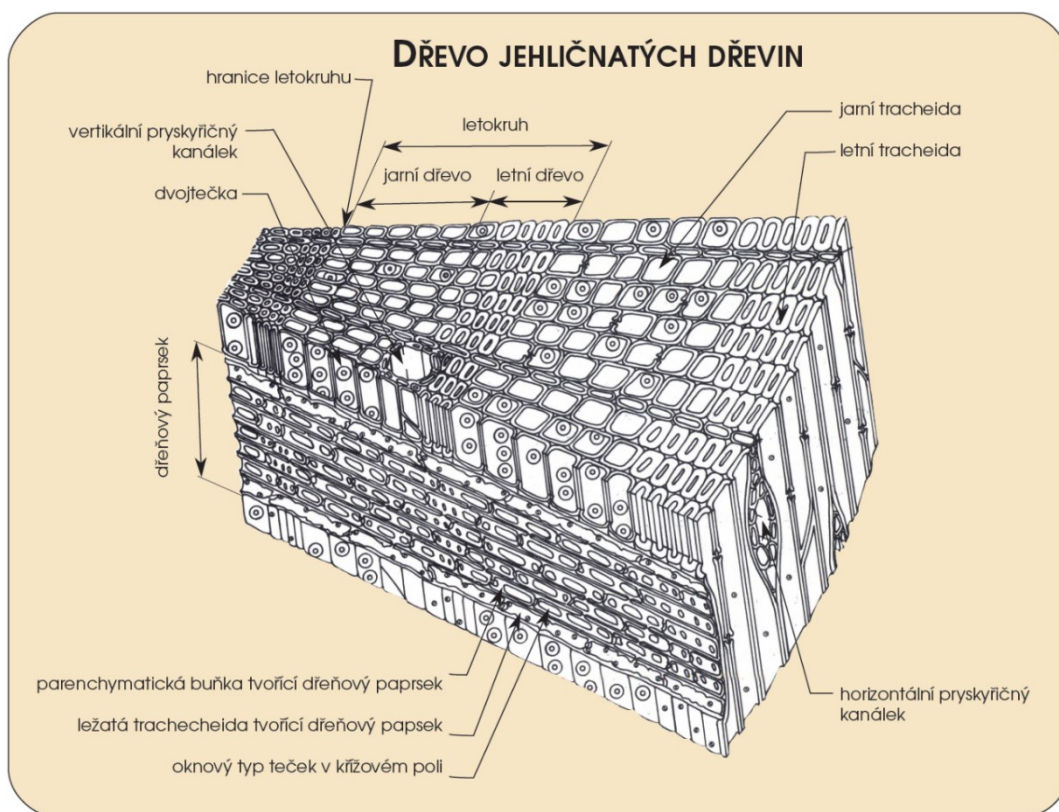
### 2.1.2. Dřevo jehličnatých vs. listnatých stromů

Listnáče a jehličnany se morfologicky značně liší ve stavbě letokruhů. Jak již bylo zmíněno, anatomicky jednodušší letokruhy se vyskytují u jehličnanů, ke kterým patří i v této práci zkoumaná PISY. Základní stavební složku **jehličnatých stromů** představují *tracheidy*, tj. cévice. Ty tvoří až 95 % objemu dřeva ([Gryc, Vavřík 2014](#)). Na začátku vegetační sezony se tvoří velké tracheidy s tenkou buněčnou stěnou, které mají transportní funkci a vzniká tak jarní dřevo. Následně se cévice na příčném řezu zplošťují a zmenšuje se jejich průměr. Zároveň se zvyšuje mocnost buněčných stěn, což souvisí s jejich primárně opornou (mechanickou) funkcí. Pás těchto tracheid se nazývá letní dřevo ([Šilhán 2013](#)). Jednotlivé tracheidy jsou propojeny tzv. tečkami, které umožňují mezibuněčný tok látek. Zbytek dřeva jehličnanů je tvořen tzv. *parenchymem*. Jedná se o živé buňky, které se podílejí např. na stavbě pryskyřičných kanálků (ochranná funkce) a dřeňových paprsků ([Speer 2010](#)).

Vzhledem k rozdílné stavbě se od sebe jarní a letní dřevo jehličnanů liší i makroskopicky – jarní je světlé, letní tmavé. Z tohoto důvodu lze mezi sebou jednotlivé letokruhy vizuálně odlišit, viz obrázky 1 (makro pohled) a 2 (mikro pohled). Na příčném řezu kmenem (řez kolmý na osu kmene) letokruhy vzdáleně tvoří soustředné kružnice, resp. kruhy. Řada po sobě jdoucích letokruhů se nazývá série ([Šilhán 2013](#)). Z většího počtu sérií (zpravidla alespoň 10, ale závisí na stanovištní variabilitě) se pak tvoří chronologie ([Speer 2010](#)).



**Obrázek 2:** Mikroskopické schéma stavby dřeva jehličnanů.



**Zdroj:** Gryc, Vavrčík 2014

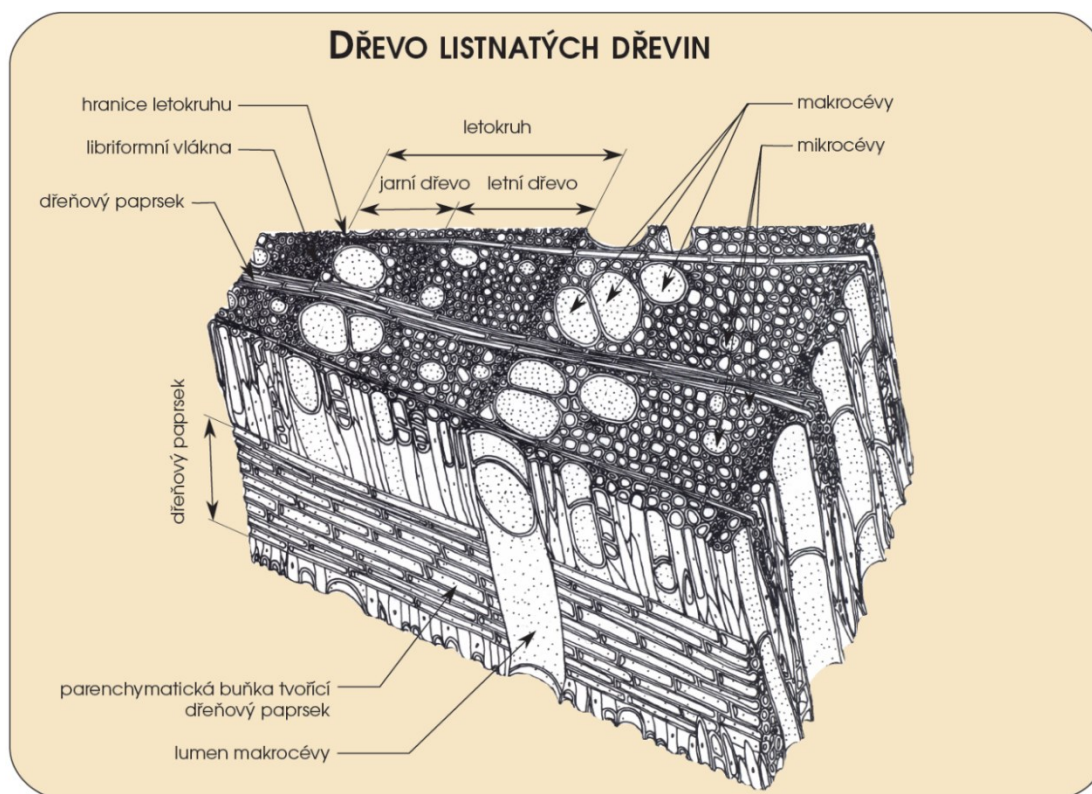
Anatomie dřeva **listnatých stromů** je komplexnější a zároveň i různorodější napříč různými zástupci této skupiny. Vedle složek vyskytujících se ve dřevě jehličnanů se na jejich stavbě podílí libriformní vlákna a cévy (někdy též póry). Vlákna mají zejména opornou funkci a zaujímají až 60 % objemu dřeva (Gryc, Vavrčík 2014). Většina vedené vody se transportuje skrze cévy, které lze dále podle jejich průměru rozdělit na mikro- a makrocévy. Vnitřní část cévy se nazývá lumen (Speer 2010).

Podle struktury, resp. prostorového uspořádání stavebních prvků dřeva listnáčů se vymezují dvě (Šlezingerová, Gandelová 2002), resp. tři (Speer 2010, Gryc, Vavrčík 2014) skupiny těchto stromů. Letokruhy listnáčů s **kruhovitě pórovitou** stavbou (např. dub či jasan) jsou makroskopicky lehce rozlišitelné. To je způsobeno pruhem makrocév, které se tvoří na začátku sezóny, ještě před nasazením listů. Tento růst je závislý na zásobách vytvořených v předchozím roce. Ve dřevě listnatých stromů s **roztroušeně pórovitou** stavbou se tvoří cévy po celý rok nezávisle na hranicích letokruhů (Speer 2010). Z toho důvodu je hranice letokruhů u některých zástupců makroskopicky nezřetelná (např. topol či vrba), u jiných (např. javor) však stále poměrně rozeznatelná (Šlezingerová, Gandelová 2002). Třetí skupina, listnáče s **polokruhovitě pórovitou**



stavbou (patří sem např. jilm či ořešák), leží z pohledu anatomické stavby, a tedy i makroskopické identifikovatelnosti letokruhů, někde mezi oběma předchozími ([Speer 2010](#)). Jak obecně vypadá stavba listnatých stromů je znázorněno na obrázku 3 níže.

**Obrázek 3:** Mikroskopické schéma stavby dřeva listnáčů.



**Zdroj:** [Gryc, Vavřík 2014](#)

## 2.2. Vliv klimatu na růst stromů

### 2.2.1. Cookův model

Obecně se o popis a vysvětlení všech vlivů určujících výslednou šířku letokruhu v daném roce  $t$  snaží tzv. Cookův model ([Cook, Kariukstis 1990](#)). Jedná se o lineární agregovaný model tvořený členy v rovnici 1 níže.

Dendrochronologické, a zejména pak dendroklimatické studie se zpravidla snaží ze vztahu níže extrahovat (a maximalizovat) klimatický signál  $C$  a zároveň potlačit ostatní faktory, které jsou v daném případě považovány za šum ([Kyncl 2017](#)). Pro pochopení celého modelu a další zkoumání vztahu klima–růst je však potřeba popsat všechny jeho parametry.

**Rovnice 1:** Cookův lineární model.

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t$$

kde  $R$  = pozorovaná šířka letokruhu,

$A$  = věkový trend,

$C$  = klimatický signál,

$D1$  = endogenní disturbační faktor,

$D2$  = exogenní disturbační faktor,

$E$  = náhodná odchylka.

**Zdroj:** [Cook, Kariukstis 1990](#)

Symbol  $\delta$  u endogenního a exogenního disturbačního faktoru je binární indikátor, který buď nabývá hodnoty 0 nebo 1.  $\delta = 0$  znamená, že vliv daného faktoru na výslednou šířku letokruhu  $R$  v daném roce  $t$  nenastal, zatímco  $\delta = 1$  znamená opak. V tom se  $D1$  a  $D2$  liší od parametrů  $A$ ,  $C$  a  $E$ , jež se promítají do každého  $R_t$ .

Věkový (někdy též velikostní) trend  $A$  vychází ze skutečnosti, že stromy produkují každoročně vrstvu dřeva na plášti kužele kmenu, ten se zvětšuje a objem vyprodukovaného dřeva by se také musel každoročně geometricky zvětšovat, což není možné ([Speer 2010](#)). Proto v mládí (malý kmen) tvoří zpravidla letokruhy širší a s přibývajícím věkem (zvětšující se kmen) se jejich šířka postupně snižuje. Charakter věkového trendu je závislý na mnoha podmínkách, například přítomnosti a intenzitě kompetice mezi jednotlivými stromy. Z toho důvodu byla vytvořena celá řada matematických přístupů, jak lze tento trend v jednotlivých sériích eliminovat (např. [Bunn 2008](#)), jde o tzv. *detrendování*.

Klimatický signál  $C$  zahrnuje všechny klimatické vlivy, které mohou v daném roce  $t$  působit na růst stromů (vyjma těch vlivů, které souvisí se stanovištními disturbancemi). Mezi nejčastější proměnné patří srážky a teploty, dále pak různě vyjádřené indexy popisující sucho související s oběma předchozími meteorologickými prvky ([Cook, Kariukstis 1990](#)).

Oba faktory  $D1$  a  $D2$  značí určitou disturbanci. Rozdíl je v tom, že endogenní (někdy též lokální) se projevuje pouze u některého jedince (příp. několika jedinců), nikoliv však u celého porostu. Pokud disturbance ovlivňuje celou lokalitu, pak se jedná o faktor

exogenní. Příkladem *D1* je změna kompetičních podmínek (např. prosvětlení okolí stromu), což může být způsobeno třeba pádem sousedního jedince (White 1979). Důležité je, že lokální disturbance jsou časově i prostorově nahodilé a není mezi nimi tak v rámci porostu pozorována korelace. Opak platí o projevech exogenních disturbancí, mezi něž patří požáry, plošné napadení škůdci či chorobami apod. Do této kategorie se zařazují i extrémní meteorologické a klimatologické jevy jako třeba vichřice nebo ledové bouře (Cook, Kariukstis 1990).

Poslední faktor *E* pak vysvětluje variabilitu *R*, která není vysvětlena ani jedním z předchozích faktorů. Zde platí předpoklad, že *E* nekoreluje ani prostorově mezi různými stromy, ani v rámci jednotlivých sérií. Zařazují se sem gradienty v půdních a hydrologických charakteristikách či jiné nepatrné odlišnosti podmínek nepodchycených v rámci stanoviště a genetická variabilita. Spadají sem i předpokládané chyby měření (Cook, Kariukstis 1990).

### 2.2.2. Chybějící a falešné letokruhy

Pokud panují vhodné podmínky, pak se auxinu tvoří dostatek a směrem k bázi kmene iniciuje radiální růst. Naopak v nepříznivých letech (limitujícím faktorem bývá zejména teplota) jeho snížené množství může vést k tomu, že se letokruh v části kmene nevytvoří (Speer 2010). V takových případech se často letokruhy tvoří jen v horní části kmene a v místech vyššího namáhání dřeva, např. pod větvemi nebo na straně přivrácené či odvrácené od svahu (Stokes, Smiley 1996). To může komplikovat dendrochronologické práce, jelikož se v takových místech zpravidla vzorky neodebírají (více viz kapitola 6.1.2.). Taková situace však obecně nenastává příliš často. Například George a kol. (2013) při analýze 2359 letokruhových řad, pocházejících z různých míst mírného pásu severní polokoule, vypočetli, že v průměru chybí jeden letokruh na 240 přítomných. Ještě méně často nastává situace, kdy letokruhy chybí zcela. Příčinou jejich neutvoření je patrně taktéž nepříznivé klima, konkrétně extrémní sucho (Novak a kol. 2011). Posledním typem chybějících letokruhů jsou tzv. kontinuálně chybějící vnější letokruhy u báze stromů (Wilmking a kol. 2012). Ty jsou dávány do souvislosti např. s kompeticí uvnitř zapojeného porostu či zvýšenou akumulací půdy u kmene.

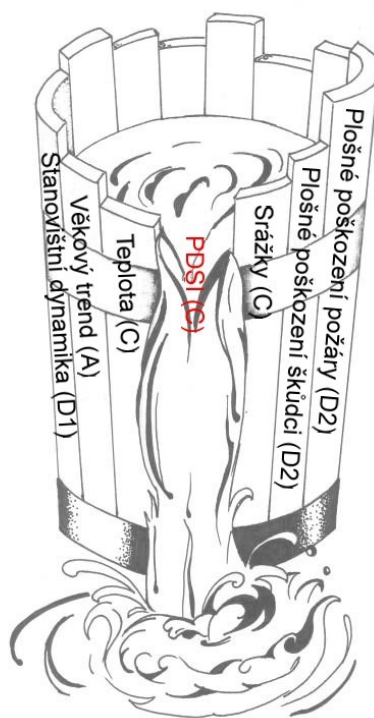
Opačným případem komplikujícím dendrochronologickou analýzu je situace, kdy strom vytvoří více letokruhů v jedné sezóně. Tyto redundantní letokruhy se nazývají falešné, v poslední době se taktéž začíná prosazovat označení *hustotní fluktuace v rámci letokruhu* (De Micco a kol. 2016). Příčiny jsou většinou klimatické – falešný letokruh se například tvoří, je-li strom vystaven nedostatku vody ve vegetačním období, které

je posléze v té samé sezoně vystřídáno vlhčími podmínkami (Fritts 1976). Faktorem ovlivňujícím tvorbu falešných letokruhů může být ale i věk jedince, kdy jsou k jejich tvorbě více náchylné mladší stromy. Obdobný vliv má sociální postavení jedince v rámci porostu – zastíněné stromy v konkurenční nevýhodě tvoří méně falešných letokruhů než stromy kodominantní (Copenheaver a kol. 2006).

### 2.2.3. Princip limitujících faktorů

Jak již bylo zmíněno, tvorbu letokruhů lze obecně popsat pomocí Cookova modelu. Do jejich formování však dále zasahují odlišné fyziologické vlastnosti různých druhů stromů a vnější podmínky prostředí, kde daný les (či strom) roste. Zejména při studiích zaměřených na rekonstrukci klimatu se proto doporučuje provádět výzkum tam, kde daný druh roste na hranici (či v její blízkosti) svého přirozeného výskytu. Taková lokalita je totiž zpravidla klimaticky citlivá – je zde vyšší pravděpodobnost toho, že stromy budou limitovány nějakým klimatickým faktorem (Fritts 1976). Takový předpoklad vychází z *principu limitujících faktorů*. Ten říká, že růst organismu řídí nejvíce limitující faktor (Speer 2010). Tento princip vychází ze *zákona minima* navrženého v 19. století von Liebigem původně v souvislosti se zkoumáním zemědělských výnosů (de Baar 1994), více viz obrázek 4 níže.

**Obrázek 4:** Princip limitujících faktorů růstu. V závorkách je uvedena příslušnost faktorů k jednotlivým členům Cookova modelu.



**Zdroj:** Speer 2010, upraveno

Obrázek 4 na ilustraci různě vysokých latí tvořících sud demonstruje vliv jednotlivých faktorů na růst hypotetického stromu. Je vidět, že v daném případě nejvíce limitujícím (nejnižší lať zvýrazněná červeným popisem), a tedy i určujícím faktorem růstu je sucho reprezentované indexem PDSI, tedy Palmerovým indexem intenzity sucha ([Palmer 1965](#)).

#### **2.2.4. Ostatní faktory ovlivňující šířku letokruhů**

Další jev působící na šířku jednotlivých letokruhů souvisí s tím, že jsou stromy fyziologicky aktivní po celou dobu svého života, tedy nikoliv pouze ve vegetačním období. Ač jsou letokruhy produktem střídání období růstu a období dormance, pořád se jedná o kontinuální proces a diskrétní rozdělení na jednotlivé roky nefunguje stoprocentně. Příkladem je třeba ukládání stavebních látek (cukrů, hormonů) vytvořených v určitém roce, které strom použije až v roce (či letech) následujícím ([Speer 2010](#)). Podmínky v předchozích letech tedy ovlivňují růst v roce současném, což vede k určité časové autokorelaci v letokruhových řadách ([Fritts 1976](#)). Ta se přirozeně vyskytuje i v samotných klimatických datech ([Trenberth 1984](#)). Při procesu maximalizace klimatického signálu je v letokruhových sériích autokorelace často nežádoucí a odstraňuje se ([Cook, Kariukstis 1990](#)).

## 3. EXTRÉMNÍ RŮST STROMŮ

### 3.1. Reakce stromů na extrémní události

Extrémními událostmi se v daném kontextu rozumí změny v prostředí jedince či celého stanoviště, které vedou k anomáliím v tvorbě dřeva. Těchto anomálií existuje celá řada a jejich původ lze rozdělit do dvou hlavních kategorií; 1) mechanický stres, 2) klimatický stres, kdy na druhý je zde vzhledem k cílům této práce kladen větší důraz ([Bräuning a kol. 2016](#)). Optikou členů Cookova modelu je mechanický stres způsoben endogenními ( $D1$ ) či exogenními ( $D2$ ) faktory, zatímco klimatický stres spadá pod účinky klimatického faktoru ( $C$ ).

#### 3.1.1. Mechanický stres

Typickým příkladem odezvy stromu na mechanický stres je tvorba tzv. **reakčního dřeva**. To se většinou tvoří při excentrickém růstu (vychýlení osy kmene z její přirozeně vertikální polohy), avšak není to pravidlem ([Šilhán 2013](#)). Reakční dřevo se vyznačuje nápadně širokými letokruhy. Fyziologicky ani příčinou vzniku se toto dřevo mezi jehličnany a listnáči neliší, ovšem rozdíl je v jeho pozici. U jehličnanů se tvoří tzv. kompresní dřevo, které vzniká na straně, kam je kmen nakloněn a svým tlakem se snaží strom navrátit zpět do vertikální polohy. Při stejné činnosti mají listnáče opačnou strategii. Tvoří totiž tzv. tenzní dřevo. To vzniká na opačné straně než kompresní – z důvodu tahu kmene zpět do vzpřímené pozice ([Speer 2010](#)).

Dalším projevem mechanického stresu může u jehličnatých stromů být zvýšená **tvorba pryskyřičných kanálků** (tzv. traumatických), které vznikají např. jako reakce na povrchová zranění způsobená nárazem či napadením škůdci ([Bräuning a kol. 2016](#)). Vzhledem k rozdílné morfologii je ale třeba mít na paměti, že druhy z čeledi borovicovitých (tedy i v této práci zkoumaná PISY) vytvářejí velké množství pryskyřice v průběhu normálního růstu, tj. bez potřeby mechanického poškození ([Šilhán 2013](#)).

#### 3.1.2. Klimatický stres

Jedním z projevů klimatického stresu jsou již zmíněné **chybějící a falešné letokruhy** (více viz kapitola 3.2.2.). Dále sem patří **mrazové letokruhy**, tedy mrazem deformované tracheidy, parenchymatické buňky či jiné složky dřeva ([Hantemirov a kol. 2004](#)). Vznikají v důsledku náhlých poklesů teplot pod bod mrazu v průběhu vegetační sezony. Jejich přítomnost tak dobře koreluje například s vulkanickými erupcemi ([LaMarche,](#)



Hirschboeck 1984). Zkoumáním mrazových letokruhů lze do jisté míry rekonstruovat výskyt mrazů, avšak z jejich přítomnosti nelze odvozovat přesnou teplotu, a to třeba proto, že záleží na druhu stromu, lokalitě, ale také fázi vegetačního období a věku. S narůstajícím stářím, resp. s tloušťnutím kmene je pravděpodobnost tvorby mrazových letokruhů nižší (Bräuning a kol. 2016). Jinými slovy jejich tvorba záleží i na věkovém trendu. A. Frekvence výskytu mrazových letokruhů záleží na zmíněných faktorech. Například na západě Manitoby, kde je průměrná roční teplota pouze 1,6 °C, Waito a kol. (2013) detekovali mrazové letokruhy až ve 40 % všech zkoumaných letokruzích. Na druhou stranu Kyncl (2017) uvádí, že se ve středoevropských podmínkách průměrně vyskytují pouze ve 3–5 % let.

Dalším projevem extrémních klimatických událostí mohou být **radiální trhliny**, které jsou způsobeny zejména mrazem, suchem, větrem či blesky (Knuchel 1947 cit. v Cherubini a kol. 1997). Nejčastěji se vyskytují u jehličnanů a zpravidla se jedná o trhliny uvnitř jednotlivých letokruhů. Někdy dosahují ale i větších rozměrů, které mohou být zcela uvnitř, případně vést na povrch kmene (Bräuning a kol. 2016). Vznik je zapříčiněn smršťováním dřeva, který mnohdy souvisí s nedostupností vody. Ta může být způsobena například tzv. zimním vysycháním, kdy se k transpirujícím orgánům nedostává voda z kořenů kvůli zamrzlé půdě (Cherubini a kol. 1997). Využití radiálních trhlin v dendroklimatologii je problematické, protože se nenachází v posledním letokruhu, nýbrž v 1–3 předchozích, což značně komplikuje datování událostí, při kterých tyto trhliny vznikají (Bräuning a kol. 2016).

Podobné podmínky, za kterých se tvoří mrazové letokruhy, panují při vzniku **světých letokruhů** (anglicky se ještě rozlišují *pale rings* nebo *light rings*). V temperátní a boreální zóně jsou způsobeny nízkými teplotami ve vegetační sezoně, které neumožňují vytvoření buněk pozdního dřeva. Nachází se u jehličnanů a jak název napovídá, jedná se o světlé letní dřevo způsobené ztenčenou vrstvou tlustostěnných tracheid (Filion a kol. 1986). Jejich tvorba je omezena potlačenou lignifikací a výskyt patrně nesouvisí s věkem stromu ani celkovou šířkou daného letokruhu (Wang a kol. 2002). V semiaridním podnebí jejich výskyt koreluje s nedostatkem vody, konkrétně od podzimu předchozího do léta daného roku (Liang, Eckstein 2006). Světlé letokruhy se zpravidla vyskytují častěji než mrazové, mohou se ale také tvořit společně (Hantemirov a kol. 2004). Podobnou nevýhodou jako u mrazových letokruhů je to, že mohou vznikat se zpožděním, u sopečných erupcí například až po 1–2 letech (Briffa a kol. 1998). Světlé letokruhy se tvoří také v listnáčích. Zde jejich vznik souvisí však s jinými faktory, například se srážkami či nadmořskou výškou (Pourtahmasi a kol. 2011).

Několik vědeckých prací popisuje **bílé letokruhy** (u listnáčů) či častěji **bílé jarní dřevo** (u jehličnanů). Tyto anomálie byly zkoumány zejména v boreální zóně Kanady (Hogg a kol. 2002, Sutton, Tardif 2005, Waito a kol. 2013). Často se tvoří ve stejný rok či v roce následujícím po vzniku mrazových letokruhů, či při jiném poškození stromu, které vedlo k částečné defoliaci, tj. ztrátě listů (Sutton, Tardif 2005). Jejich vznik tak může souviset s nedostatkem asimilovaného C nebo nedostatkem fytohormonů (Waito a kol. 2013). Bílé letokruhy popisují také Yanosky, Jarett (2001) cit. v Speer (2010), jejich příčina vzniku však v tomto případě nesouvisí s klimatickými činiteli, nýbrž s účinky povodní a následnou defoliací.

Dalším makroskopickým projevem působení extrémních klimatických událostí jsou **anomálie v jarním dřevě kruhovitě pórovitých listnáčů**. Tyto anomálie se mohou projevovat velmi různorodě, proto je Bräuning a kol. (2016) rozdělili do třech základních skupin; 1) anomálie vyznačující se abnormálně malými makrocévami, 2) anomálie vyznačující se abnormálně velkými makrocévami a 3) anomálie s výskytem traumatického pletiva. Jejich vztah ke klimatu je podobně komplikovaný jako samotná kategorizace těchto anomálií. Někteří autoři dávají například letokruhy s malými makrocévami do souvislosti se suchými podmínkami v předchozí zimě a stávajícím jaře (González, Eckstein 2003), jiní s výrazně chladným průběhem těchto období (Fletcher 1975 cit. v Bräuning a kol. 2016). Ovšem ty samé anomálie mohou být způsobeny i neklimatickými faktory, a to například mechanickým poškozením, záplavami či napadením škůdci (Copini 2015).

Nejběžnější využívanou proměnnou v dendrochronologii obecně je šířka letokruhů. Ač plně nespádají pod definici důsledku extrémní události sensu Bräuninga a kol. (2016), analýza odlišně širokých letokruhů se neomezuje jen na dendroklimatologii, ale je využívána i při zkoumání extrémních událostí. Letokruhy s nápadně odlišnou šířkou od ostatních let, které se zároveň vyskytují u většího množství jedinců (tj. na celém stanovišti) se v angličtině označují jako **pointer years (PYs, v jednotném čísle pointer year – PY)**. V češtině se někdy tento termín překládá jako letokruhově signatury (např. Píro 2011, Lehečková 2013). Šilhán (2013) však za letokruhovou signaturu označuje pouze ty PYs, které se vyskytují v řadě za sebou. Kyncl (2017, s. 15) dokonce signaturu popisuje relativně vágně jako „obzvláště charakteristické řady letokruhových křivek“. Pro jednoznačnost je tedy v této práci používán anglický termín (PY). Výhodou PYs je to, že se určují na základě kvantitativních dat, což u předchozích ukazatelů není pravidlem. Tak třeba identifikace světlých či bílých letokruhů je do značné míry závislá na zkušenostech a posouzení uživatele, což výsledky subjektivně zatěžuje (Bräuning a kol. 2016). Subjektivní zátěž se sice vyskytuje i při určování PYs (kapitola 3.2.1.),

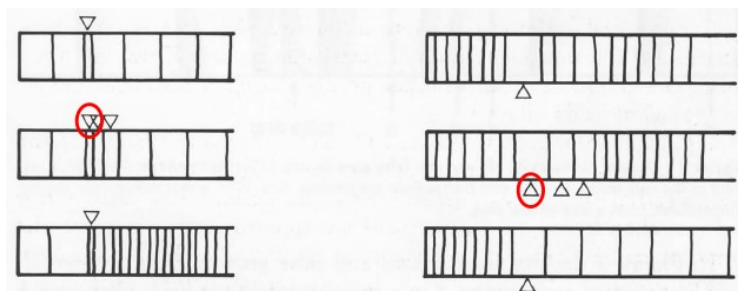


ale její míra je menší. Vzhledem k důvodům uvedeným výše byla k dosažení cílů této práce jako hlavní ukazatel zvolena šířka letokruhů a z ní definované PYs.

### 3.2. Hodnocení extremity klimatu pomocí pointer years

Pojem PY je dnes chápán jako „rok, ve kterém mnoho jedinců ze zkoumané skupiny stromů vykazuje event year“ (Schweingruber a kol. 1990, s. 19). Z této definice plynou dvě důležité poznámky: 1) pro její pochopení je třeba definovat ještě tzv. event year, 2) celkové vymezení není příliš konkrétní. Alespoň v tom smyslu, že výrazem mnoho jedinců poskytuje relativně široký prostor pro její interpretaci a vznikají tak rozdílné přístupy ve stanovování těchto pointer years (viz následující kapitoly). Letokruh při event year je „charakterizován svou nápadností v rámci omezeného úseku dané (letokruhové) sekvence“ (Schweingruber a kol. 1990, s. 11). Autoři tím myslí makroskopicky detekovatelné náhlé změny v šířce letokruhů. Ty mohou být jak pozitivní (nárůst šířky), tak negativní (pokles šířky, viz obrázek 5 níže).

**Obrázek 5:** Příklady negativních (vlevo) a pozitivních (vpravo) event years.



**Zdroj:** Schweingruber a kol. 1990, upraveno

Svislé čáry na obrázku 5 reprezentují hranice jednotlivých letokruhů, kdy roky přibývají zleva doprava. Za event year je považován vždy jen první letokruh s neočekávanou šířkou letokruhu (viz červené elipsy).

Z popisu výše lze vyvodit hlavní rozdíl mezi event year a PY. U PY lze registrovat změnu v šířce letokruhu vytvořeném v daném roce u většího počtu studovaných stromů (tedy lze vztáhnout na celý zkoumaný porost) a tak je možné dedukovat, že tuto změnu způsobil vnější velkoplošně působící faktor, například klima (dle Cookova modelu faktor  $C$ ). Event year je pozorován u daného jedince (nikoliv porostu) a jeho příčinou může být třeba jen náhodná odchylka v růstu či jiný lokální, neklimatický faktor – dle Cookova modelu např.  $D1$  či  $D2$  (Neuwirth a kol. 2004). Jinými slovy, PYs (vyplývající z dostatečného výskytu event years) jsou metodou, která prostřednictvím náhlých změn

v šířkách letokruhů zkoumá změny v environmentálních podmínkách prostředí, které jsou zejména klimatického původu (např. [Desplanque a kol. 1999](#), [Neuwirth a kol. 2004](#)).

### 3.2.1. Statistické přístupy stanovení pointer years

S postupem času se přirozeně vyvíjely metodické přístupy určování event, resp. pointer years. Vylepšující se metody umožňovaly také širší využití těchto ukazatelů.

Z počátku, když převažovaly observační metody zkoumání, sloužily PYs (tehdy takto nedefinované) výhradně jako nástroj *křížového datování*. Již v tomto raném dendrochronologickém období se i díky křížovému datování (prováděnému pomocí tzv. *skeleton grafů*), které je dodnes založené na detekci PYs, přišlo na to, že stromy mohou vykazovat falešné či chybějící letokruhy ([Schweingruber a kol. 1990](#)).

Metody určování PYs se začaly rozvíjet ještě v první polovině 20. století. První práce věnující se této otázce vyšla [Huberovi \(1943, cit. v Bijak 2008\)](#). Od té doby se v tomto směru vyvinul nespočet statistických ukazatelů, v jejichž používání bohužel dodnes nepanuje konsensus ([Jetschke a kol. 2019](#)).

V posledních dekádách se nejvíce využívaly čtyři základní metody, které jsou popsány níže: 1) intervalový trend, 2) relativní změna růstu, 3) normalizace v plovoucím okně, 4) extrémní hodnoty v chronologii ([Jetschke a kol. 2019](#)).

Metoda **intervalového trendu** zkoumá absolutní změnu šířky letokruhů mezi léty  $t - 1$  a  $t$ . Podle dané změny se určuje na úrovni jedince trend  $g$ , který může nabývat třech hodnot podle rovnice 2 níže.

**Rovnice 2:** Výpočet růstového trendu jedince.

$$g_{i,t} = \begin{cases} 1 & R_{i,t} - R_{i,t-1} > 0 \\ 0,5 & \text{pokud } R_{i,t} - R_{i,t-1} = 0 \\ 0 & R_{i,t} - R_{i,t-1} < 0 \end{cases}$$

kde  $g$  = trend růstu,

$R$  = pozorovaná šířka letokruhu,

$i$  = vybraný strom,

$t$  = daný rok.

**Zdroj:** [Schweingruber 1983](#) cit. v [Jetschke a kol. 2019](#)

Na základě rovnice 2 se pak určuje celkový intervalový trend  $IT$  v daném roce  $t$  pro celý zkoumaný porost. Tento vztah je popsán v rovnici 3.

**Rovnice 3:** Výpočet intervalového trendu v rámci porostu.

$$IT_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_{i,t}$$

kde  $IT$  = intervalový trend,

$N$  = počet zkoumaných stromů,

$g$  = trend růstu,

$i$  = vybraný strom,

$t$  = daný rok.

**Zdroj:** Schweingruber 1983 cit. v Jetschke a kol. 2019

Jako PY je označen každý rok, kdy  $IT$  (nabývající hodnot od 0 do 1) přesáhne předem stanovenou mez vyjadřující podíl stromů se stejným trendem. Při zavádění této metody Huberem a Giertz-Siebenlistem (1969) cit. v Bräuning (1994) byla daná mez stanovena na 75 %. V té době se místo označení  $IT$  používal pojem *pointer interval* (Schweingruber a kol. 1990). Ve svém principu se výpočet nezměnil, zmíněná mez je ale v různých pracích zvolena odlišně. Zpravidla se pohybuje mezi 75–100 % (Jetschke a kol. 2019).

Přibližně stejně často jako metoda intervalového trendu se používá **relativní změna růstu**. Ta srovnává šířku letokruhu s průměrnou šířkou  $n$  předcházejících let (Schweingruber 1996 cit. v Jetschke a kol. 2019). Oproti metodě intervalového trendu se tedy liší tím, že se v potaz bere více předchozích let, viz rovnice 4 níže.

**Rovnice 4:** Výpočet relativní změny růstu.

$$RGC_t(-n) = \frac{R_t}{\bar{R}(-n)}, \text{ podle něhož } \bar{R}(-n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R_{t-k}$$

kde  $RGC$  = relativní změna růstu,

$R$  = pozorovaná šířka letokruhu,

$n$  = počet předcházejících let,

$t$  = daný rok.

**Zdroj:** Schweingruber 1996 cit. v Jetschke a kol. 2019

Následně je třeba zvolit dvě různé meze, které musí být pro dosažení PY překročeny. Jde o klasický postup pospaný v kapitole 3.2. Nejdříve se tedy určí hodnota  $RGC$ , při jejímž překročení zkoumaným jedincem vznikne event year. Poté se stanoví minimální podíl všech jedinců, které musí vykazovat event year, aby byl daný rok označen za PY.

Nejčastěji používanou metodou stanovení PYs je tzv. **normalizace v plovoucím okně**. Ta je založena na výpočtu tzv. Cropperových hodnot neboli **Cropper values (C values)** pro jednotlivé roky na úrovni sérií. Tento ukazatel (viz rovnice 5) byl zaveden [Cropperem \(1979\)](#), a to ve spojitosti s rozvojem výpočetní techniky a s ní související automatizací statistických výpočtů. V té době se Cropper snažil o statistické hodnocení relativní „úzkosti“ letokruhů na základě jejich porovnání s nejbližšími sousedními letokruhy. Jeho hlavním cílem bylo ulehčit (a tím pádem zrychlit) proces křížového datování.

**Rovnice 5:** Výpočet C value.

$$CV_t = \frac{X_t - \bar{X}_t^{(n)}}{\sigma_t^{(n)}}$$

$$\text{ve kterém } \bar{X}_t^{(n)} = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n X_{t+k}$$

$$\text{a } \sigma_t^{(n)} = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{k=-n}^n (X_{t+k} - \bar{X}_t^{(n)})^2}$$

kde  $CV$  = C value,

$X$  = pozorovaná šířka letokruhu,

$\bar{X}$  = průměrná šířka letokruhů,

$n$  = počet let,

$\sigma$  = směrodatná odchylka,

$t$  = daný rok.

**Zdroj:** [Cropper 1979](#), [Jetschke a kol. 2019](#)

Počet let  $\pm n + 1$  vstupujících do výpočtu určuje celkovou délku klouzavého okna, v jehož rámci se počítá C value pro centrální bod (letokruh). Zpočátku se uplatňovaly spíše kratší okna, autor konceptu [Cropper \(1979\)](#) navrhoval 5leté období. V navazujících studiích však různí autoři délku okna většinou prodlužovali (např. [Bijak 2008](#), [Neuwirth a kol.](#)

2007) a dnes je [Jetschke a kol. \(2019\)](#) doporučeno používat 13leté okno. Autoři argumentují tím, že s delším oknem se eliminuje náhodná odchylka růstu v jednotlivých letech, která by jinak mohla potlačit klimatický signál. Nevýhodou delších oken je zvětšení tzv. koncového efektu – z principu výpočtu se s rostoucí velikostí okna zvětšují i úseky začátku a konce série, pro které se C values nepočítají ([Cropper 1979](#)). Další dva parametry, které uživatel musí pro označení roku jako PY zvolit, jsou stejné jako u metody relativní změny růstu. Mezní hodnotu C value Cropper původně nastavil na 0,75 a to s cílem navýšit počet let označených jako ty „s významně úzkými letokruhy“ ([Cropper 1979, s. 50](#)). Dnešní terminologií tak chtěl zvětšit výskyt negativních event years. [Neuwirth a kol. \(2007\)](#) tento koncept následně rozpracovali a vytvořili třístupňovou kategorizaci třídící PYs podle jejich intenzity (slabý, silný a extrémní PY). Podíl zkoumaných stromů vykazujících event year pro klasifikaci roku jako PY navrhuje [Jetschke a kol. \(2019\)](#) stanovit na 75 %, tedy stejně jako v případě relativní změny růstu.

Poslední významně používaným přístupem pro stanovení PYs je metoda **extrémních hodnot v chronologii**. V podstatě se jedná o stejný přístup jako v případě normalizace v plovoucím okně s tím rozdílem, že celý početní úkon detekující PYs probíhá až na úrovni chronologie (např. [Scharnweber a kol. 2013](#)). Jinými slovy je tato metoda založena na variabilitě v rámci celé chronologie, nikoliv jen okně o určité časové délce. Pro výpočet se chronologie z-transformuje podle rovnice 6 níže.

**Rovnice 6:** Výpočet z-transformované chronologie.

$$z_t = \frac{X_t - \bar{X}}{\sigma}, t = 1, \dots, T$$

$$\text{ve kterém } \bar{X} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X_t \quad \text{a } \sigma = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X})^2}$$

kde  $z$  = z-skór,

$X$  = letokruhový index,

$\bar{X}$  = průměrný letokruhový index všech letokruhů,

$\sigma$  = směrodatná odchylka,

$T$  = délka chronologie,

$t$  = daný rok.

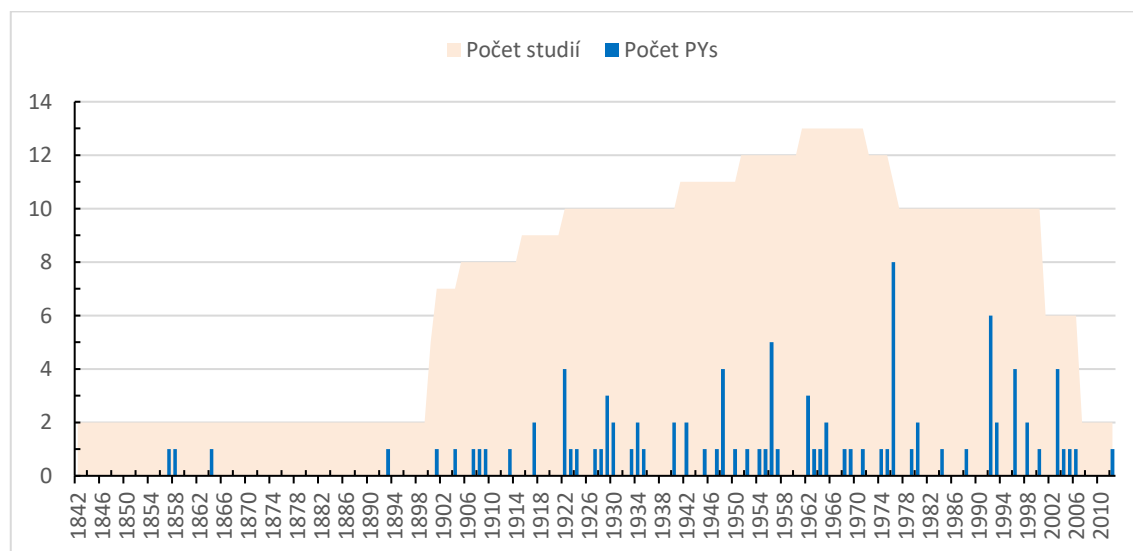
**Zdroj:** [Jetschke a kol. 2019](#)

Do výpočtu vstupují detrendovaná data (očištěna o vliv věkového trendu), proto se mluví o indexech, nikoliv naměřených šířkách. Z toho důvodu velmi záleží na výběru detrendovací metody. Obecně se doporučuje používat spíše flexibilní funkce (např. kubický spline), které zachovávají vysokofrekvenční variabilitu (Jetschke a kol. 2019). Za PYs se nakonec určí ty roky, ve kterých absolutní hodnota z-skóru  $|z_t|$  překročí uživatelem stanovenou hranici, například 1,5 (Scharnweber a kol. 2013).

### 3.3. Evidence extrémních snížení růstu ve střední Evropě

Zkoumáním extrémního růstu stromů ve střední Evropě za použití metody PYs se zabývalo mnoho autorů. Při sumarizaci a porovnávání jejich výsledků je potřeba brát v potaz několik faktorů, které mohou vést u různých prací k různým závěrům. Studie se liší například zájmovým územím (samotné vymezení pojmu střední Evropa je velice nejednotné). Jedná se o velmi důležitý faktor, neboť výskyt roků, kdy je v jedné části střední Evropy detekován negativní PY a současně v jiné pozitivní PY, není výjimečný (Babst a kol. 2012). Další podstatné rozdíly mezi studiemi jsou zvolená metodika určování PYs (vedoucí k různé váze výsledků) a zkoumání různých druhů stromů v odlišných fyzickogeografických podmínkách (FG). S vědomím všech těchto heterogenit vznikl graf na obrázku 6 níže.

**Obrázek 6:** Vývoj počtu negativních PYs ve střední Evropě mezi roky 1841–2012.



**Zdroj:** Babst a kol. 2012, Bauwe a kol. 2013, Bijak 2008, Čejková, Kolář 2009, Kolář a kol. 2017, Koprowski a kol. 2012, Lehečková 2013, Lévesque 2013, Neuwirth a kol. 2004, Neuwirth a kol. 2007, Schultz a kol. 2009, Simon, Lena 2016, Vejpustková, Čihák 2019

Data zobrazená v grafu na obrázku 6 pochází ze 13 různých studií s různým časovým pokrytím. Obrázek zachycuje ve vybrané literatuře popsané významné negativní PYs v období 1841–2012 (překryv s obdobím, ve kterém byly zkoumány nejextrémnější růstové roky v této DP, viz kapitola 6.3.3.).

Celkem bylo v tomto období zaznamenáno 97 PYs. Nejčastěji popisovaným (8x) negativním PY je rok 1976. Unikátní je rozsahem území, ve kterém je zdokumentován. To se rozprostírá na S Itálie, ve Švýcarsku ([Lévesque 2013](#), [Neuwirth a kol. 2004](#)), v Německu, Beneluxu, Česku ([Babst a kol. 2012](#), [Schultz a kol. 2009](#), [Vejpustková, Čihák 2019](#)) a táhne se až do S Polska ([Koprowski a kol. 2012](#)). Obecně je vznik tohoto PY přisuzován výraznému, dlouhotrvajícímu a rozsáhlému suchu, které mohlo být ve vyšších polohách Česka zvýrazněno silnými mrazy v průběhu května ([Vejpustková, Čihák 2019](#)). Druhý nejvíce zmiňovaný rok je 1992 (6x). Vyskytl se zejména na území Česka, kde ho někteří autoři evidují společně s rokem 1993 ([Kolář a kol. 2017](#), [Vejpustková, Čihák 2019](#)), zaznamenán byl také v Polsku ([Koprowski a kol. 2012](#)) a Švýcarsku ([Neuwirth a kol. 2004](#)). Dále se v dané literatuře vyskytuje rok 1956 (5x), a to v Německu, Beneluxu a Česku. Zatímco za Z části tohoto území je vznik PY přisuzován velmi teplému jaru s následným deficitem srážek ([Neuwirth a kol. 2007](#)), v Česku ho mohly ovlivnit podprůměrné srážky v předcházejícím listopadu a následné nízké teploty v únoru a srpnu ([Lehečková 2013](#)).

Dalšími významnými roky jsou 1922, 1948, 1996 a 2003 (všechny popsány 4x). PY roku 1922 se projevil zejména v J části střední Evropy. Zatímco [Neuwirth a kol. \(2007\)](#) hovoří o teplém a suchém přelomu a začátku roku, v Lublani se projevil vliv sucha ve vegetačním období ([Simon, Lena 2016](#)). Rok 1948 se svým rozsahem blíží záznamu z roku 1976 (výskyt je evidován zejména na Z a v centru střední Evropy). Příčinou byl dlouhotrvající deficit srážek (nastal již na konci předešlého roku) v kombinaci s velmi teplým jarem ([Neuwirth a kol. 2007](#)). Situaci pravděpodobně zhoršilo chladné vegetační období, zejména červen a červenec ([Neuwirth a kol. 2004](#)). Odlišné důvody vedly k PY v roce 1996, který je popsán hlavně v Německu a Česku. Hlavní příčinou byly patrně silné únorové mrazy ([Bauwe a kol. 2013](#), [Kolář a kol. 2017](#)) doprovázené deštivým jarem a studeným letem ([Čejková, Kolář 2009](#)). PY v roce 2003 (zaznamenaný ve 4 studiích ze 6) je bezesporu následkem abnormální vlny vedra, která přinesla dlouhotrvající nadprůměrné teploty a výrazný nedostatek srážek ([Kolář a kol. 2017](#)). Zasažené bylo Česko ([Vejpustková, Čihák 2019](#)), Německo ([Bauwe a kol. 2013](#)), ale i Švýcarsko a S Itálie ([Lévesque 2013](#)).

Za zmínku stojí i roky 1929 a 1962 (popsány 3x). První jmenovaný se projevil na J střední Evropy a jeho vznik je vysvětlován studeným a suchým létem ([Neuwirth a kol. 2007](#), [Simon, Lena 2016](#)). PY v roce 1962 byl zaznamenán v Česku a Švýcarsku. Svou roli mohly sehrát pozdní mrazy a následné sucho ve vegetačním období ([Lévesque 2013](#), [Kolář a kol. 2017](#), [Vejpustková, Čihák 2019](#)). Ostatní PYs byly zaznamenány pouze jednou či dvakrát, pro více informací viz literatura citovaná pod obrázkem 6.



## 4. CHARAKTERISTIKA BOROVICE LESNÍ (PISY)

PISY (*Pinus sylvestris* L.) je jehličnatý strom středně velkého vzrůstu. Průměrně dosahuje výšky 23–27 m, avšak může dorůst i přes 40 m (Praciak a kol. 2013 cit. v Houston Durrant a kol. 2016). Údaje o průměrné délce života se různí – Úradníček a kol. (2001) cit. v Mašek (2019) udávají 300 let, zatímco Houston Durrant a kol. (2016) hovoří o 400 letech. Nejstarší PISY jsou dokumentovány v boreální zóně. Ku příkladu Shumilov a kol. (2010) vzorkovali na poloostrově Kola 561 let starého zástupce tohoto druhu. Engelmark a kol. (1994) datovali stáří vybraných PISY na severu Švédska i přes 700 let.

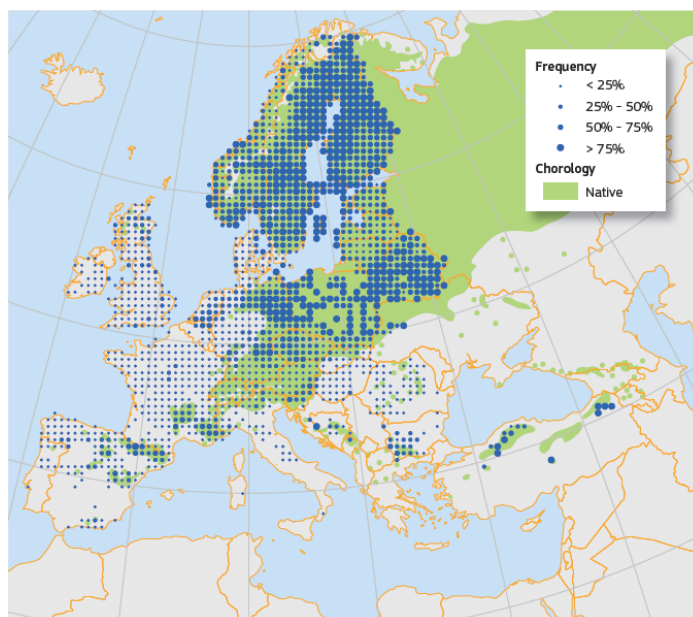
PISY je charakteristická svým zbarvením borky, které se s časem a polohou v rámci kmene mění. V mládí a ve vyšších částech kmene je oranžovo-červená, s přibývajícím věkem a blíže bázi hnědá až šedo-hnědá s charakteristickými prohlubujícími se rýhami (Houston Durrant a kol. 2016). Jehlice rostou ve svazcích po dvou a obvykle dorůstají 5–7 cm (Johnson, More 2006 cit. v Houston Durrant a kol. 2016), jiní autoři udávají rozpětí 3–8 cm a obvykle se obměňují po 2–3 letech (Úradníček a kol. 2001 cit. v Mašek 2019).

Jedná se o nejrozšířenější druh rodu borovice na světě (Sullivan 1993). Se svou širokou ekologickou valencí je typickým organismem s eurychorním areálem rozšíření. Přirozeně se vyskytuje v Eurasii mezi 37–70° s. š. (Mátyás a kol. 2004) ve výškovém rozmezí od hladiny moře až do 2600 m na Kavkaze (Houston Durrant a kol. 2016). Recentní distribuce PISY v Evropě je zachycena na obrázku 7 níže.

I z důvodu svých nízkých ekologických nároků je PISY úspěšnou pionýrskou dřevinou. Nevadí ji chudé půdy a do určité míry dobře snáší i nedostatek vody či nízké teploty, na jejichž výskyt má vytvořenou řadu fyziologických a morfologických adaptací (Krakau a kol. 2013 cit. v Houston Durrant a kol. 2016). Tyto vlastnosti ji pomohly dominovat zejména v dobách po ústupu glaciálů, kdy byla vegetace rozvolněná. PISY je totiž silně světlomilná a těžko tak snáší husté a zapojené porosty (Úradníček a kol. 2001 cit. v Mašek 2019).

Na území dnešního Česka PISY nejvíce dominovala před zhruba 15 000 lety, kdy dle pylové analýzy připadaly dvě třetiny veškerého zkoumaného pylu právě na tento druh (Pokorný 2011). V současnosti se odhaduje podíl PISY na složení tuzemských lesů na 9,8 % (Kučera, Adolt 2019). Její recentní rozšíření je výsledkem jednak působení

**Obrázek 7:** Současné rozšíření PISY (modré bodové znaky) a její přirozený areál výskytu (zelená plocha). V případě Ruska není zobrazen současný výskyt PISY z důvodu chybějících dat.



**Zdroj:** [Houston Durrant a kol. 2016](#)

člověka, obecně však odpovídá tomu, že je PISY konkurenčně slabá a v ekologicky příznivých oblastech byla vytlačena silnějšími druhy – většinou smrkem či různými druhy listnáčů ([Mátyás a kol. 2004](#)). Proto se u nás dnes vyskytuje přirozeně na strmých svazích a (nebo) extrémních substrátech, včetně strukturně, hloubkově i živinově nepříznivých půdách ([Chytrý a kol. 2010](#)).

Fytogeograficky lze středoevropské bory rozdělit do třech skupin. Nejrozšířenější jsou boreokontinentální bory, které se vyskytují na kyselých substrátech (povětšinou na silikátových horninách Českého masivu). Lesostepní bory rostou v nižších polohách na bazickém podkladu. V Česku jsou většinou nepůvodní a nejhojněji jsou rozšířeny v oblasti Ralska. Prostorově nejmenší zastoupení u nás mají perialpidské hadcové bory, které jsou vázány na suché hadcové oblasti ([Chytrý a kol. 2010](#)).

Porosty PISY jsou ve střední Evropě ohroženy invazí borovice vejmutovky či trnovníku akátu. Mezi další hrozby patří eutrofizace ([Chytrý a kol. 2010](#)) a zejména v poslední době také klimatická změna, kdy kombinace vyšších teplot a sucha v posledních letech zhoršuje zdravotní stav tuzemských porostů. Ten je charakterizován zejména stupněm defoliace, který se právě u PISY v posledních letech v Česku zvyšuje nejvíce ([Vejpustková a kol. 2019](#)).

## 5. FYZICKOGEOGRAFICKÝ POPIS LOKALIT

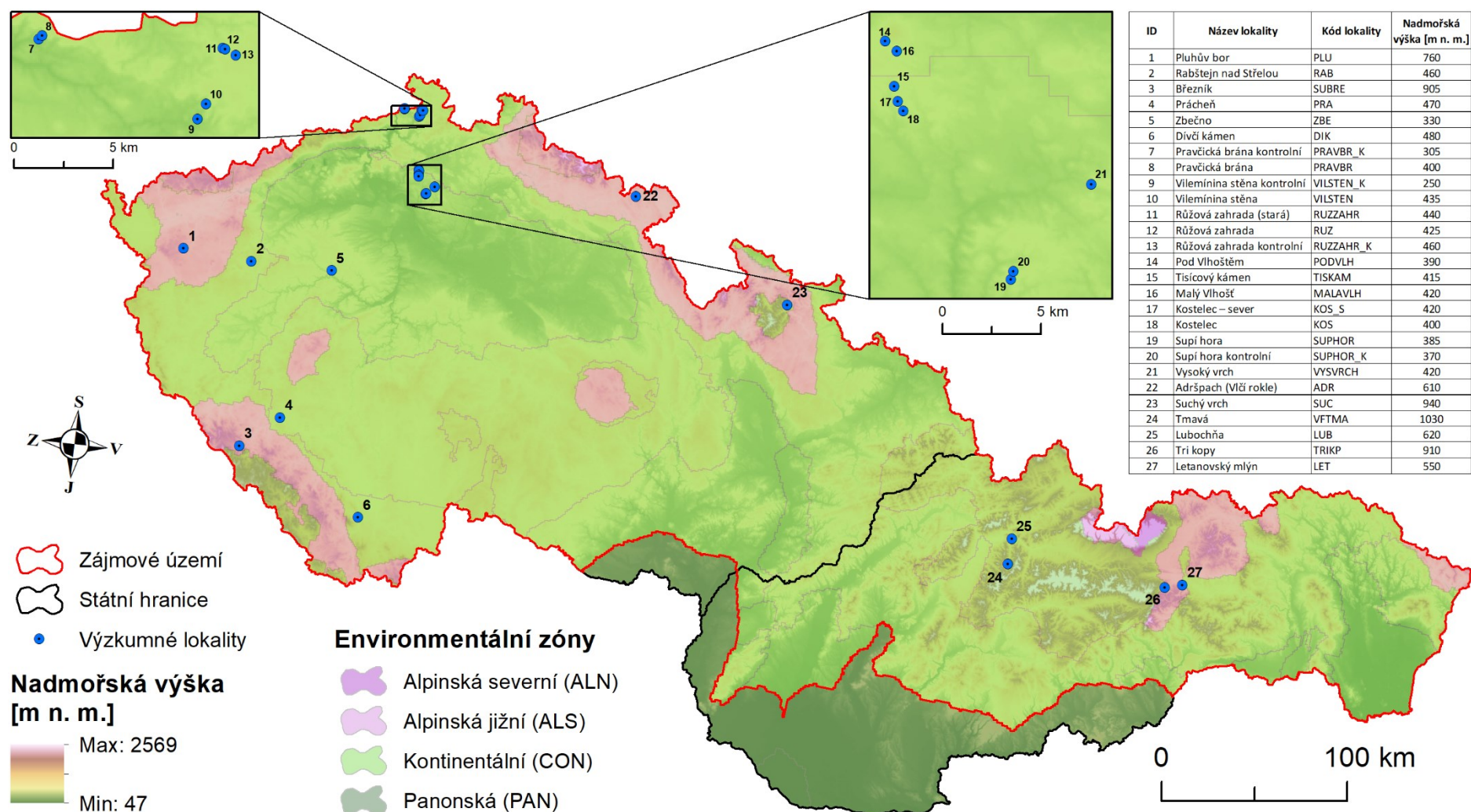
Zájmovým územím DP je prostor střední Evropy vyznačený na obrázku 8 níže. Nalézá se v něm 27 zkoumaných lokalit, které jsou rozmístěné po Česku (23) a Slovensku (4). Lokality leží v rozpětí nadmořských výšek od 250 m n. m. (*VILSTEN\_K*) do 1030 m n. m. (*VFTMA*) a obecně se nachází v různých FG podmínkách. Nicméně bylo snahou, aby jejich společným znakem byly podobné podmínky z hlediska zádržnosti vody (mělké, písčité půdy). Dalším cílem bylo při výběru lokalit vytvořit dostatečně hustou a co nejvíce rovnoměrnou síť skládající se z co nejdelších lokálních chronologií PISY. Nicméně při pohledu na obrázek 8 je patrné, že Morava a západní a jižní Slovensko jsou reprezentovány buďto sporadicky nebo vůbec. Hlavní příčinou nepřítomnosti lokalit v těchto regionech je jednoduše to, že se přirozené bory v této části Západních Karpat přirozeně vyskytují velmi vzácně ([Chytrý a kol. 2010](#)). Z důvodu této absence a obecně rozdílných podmínek prostředí tak do celkového zájmového území nebyla zahrnuta Panonská environmentální zóna vymezená [Metzgerem a kol. \(2005\)](#).

Následující podkapitoly se věnují stručnému popisu území, ve kterém se zkoumané lokality nalézají. Pokud není uvedeno jinak, pořadí v němž jsou popsány postupuje od západu k východu.

### 5.1. Pluhův bor

Pluhův bor (kódově označen *PLU*) se dle kategorizace [Demka a kol. \(1987\)](#) nachází převážně na svahu s mírně až značně skloněnými plochami s J až JV orientací, kdy jižní hranici území tvoří Pramenský potok ([GISAT 2007](#)). Tato lokalita byla v roce 1969 vyhlášena NPR, a to zejména díky svému geologickému podloží. Rozkládá se totiž na hadcích (serpentinitech), které do značné míry určují ráz tohoto stanoviště. V této oblasti tvoří hadce největší souvislou plochu v Česku a mj. se zde vyskytuje i endemit rožec hadcový ([Culek a kol. 2013](#)). Přímo na lokalitě se rozkládá bor přirozeného charakteru, svého druhu nejrozsáhlejší v rámci CHKO Slavkovský les ([Zahradnický, Mackovčín 2004](#)). Dle geomorfologického členění reliéfu Čech ([Balatka, Kalvoda 2006](#)) se území nachází na východě podcelku Hornoslavkovské vrchoviny, těsně u hranice s podcelkem Bečovská vrchovina. Konkrétně se jedná o část Vlčí hřbet ležící na podokrsku Pramenná vrchovina v okrsku Krásenská vrchovina (IIIC-1B1a1). Ta se se svou průměrnou výškou (kolem 800 m n. m.) řadí mezi nejvýše položené geomorfologické okrsky vnitrozemí Čech ([Bína, Demek 2012](#)). Tato relativně vysoká nadmořská výška (5. nejvyšší zkoumaná lokalita) se odráží v místním klimatu. Dle [Quittovy \(1971\)](#) klasifikace lokalita

**Obrázek 8:** Zájmové území s vyznačenými výzkumnými lokalitami.



**Zdroj:** ArcČR 500 2016, GISAT 2007, GKÚ Bratislava 2020, Metzger a kol. 2005



spadá do mírně teplé oblasti s krátkým, mírným až mírně chladným a suchým až mírně suchým létem (MT3), avšak několik set metrů směrem na západ se již nachází chladnější oblast CH7 (AOPK 2020). Nejrozšířenějším půdním typem je zde kambizem (dystrický subtyp), doplněná o rankery a litozem, případně v zamokřených částech gleje. V rámci biogeografického členění Culka a kol. (2013) spadá Pluhův bor do Hornoslavkovského bioregionu (1.60), kde má biota obecně hercynský charakter a je obohacena právě o hadcový, ale i údolní fenomén.

## 5.2. Rabštejn nad Střelou

Lokalita Rabštejn nad Střelou (RAB) leží východně od stejnojmenného města – nejmenšího v Čechách (Zahradnický, Mackovčín 2004) – a řeky Střely, která ji na západě ohraničuje. Je součástí PR Střela na svahu orientovaném na Z na značně až příkře skloněných plochách (Demek a kol. 1987, GISAT 2007). Kaňonovité údolí je zaříznuté do slabě metamorfovaných hornin s převahou fylitů, případně jemnějších klastických metasedimentů (Žáček 1994). Na JZ od lokality se zbřidličnatělé fylity dokonce těžily jakožto pokrývačské břidlice (Zahradnický, Mackovčín 2004). Svou stavbou se jedná o hrást'ovou vyvýšeninu, která je protnuta právě údolím meandrující Střely (Bína, Demek 2012). Zájmové území leží v geomorfologickém okrsku Rabštejnská pahorkatina (podokrsek Střelská pahorkatina, radotínská část). Ta spadá do podcelku Žihelská pahorkatina v rámci celku Rakovnická pahorkatina, tedy VB-1B3b1 (Balatka, Kalvoda 2006). Klimaticky Rabštejn nad Střelou náleží k mírně teplé oblasti velmi podobné Pluhově boru, v průměru je zde však teplejší zima o 1 °C – jedná se o MT4 (Quitt 1971, AOPK 2020). Kvůli poloze ve srážkovém stínu (Culek a kol. 2013) je zde průměrný roční úhrn srážek pouze 523 mm, což je nejméně ze všech zkoumaných lokalit (viz příloha 1). Nejběžnější půdní typ je kyselá kambizem. Lokalita přísluší k Rakovnicko-Žlutickému bioregionu (1.16), jehož biota je relativně chudá a homogenní. Reliktní bory se mimo údolí Střely vyskytují např. i na žulových srážech v okolí Žlutic (Culek a kol. 2013). Podrobnějšímu popisu lokality se věnoval Mašek (2017).

## 5.3. Březník

Druhou nejvýše položenou lokalitou v Česku je Březník (SUBRE), která leží necelý 1 km na Z od stejnojmenného vrcholu (pozor na možnou záměnu se samotou Březník ležící na J od Modravy). Lokalita se nachází na SZ NP Šumava na mírně zvlněných a vysoko položených plošinách šumavského moldanubika. Svou genezí se jedná o tektonicky vyzdviženou klenbu se zarovnanými povrchy (Bína, Demek 2012). Ty představují zbytky

třetihorního zarovnaného povrchu, které se dnes nazývají Pláně (Culek a kol. 2013). Dle kategorizace Demka a kol. (1987) se na lokalitě vyskytují mírně skloněné až značně skloněné plochy, vedle nich se ale vyskytují právě i rovinné plochy se sklonem do 2° (GISAT 2007). Březník leží na geomorfologickém podcelku Šumavské pláně, v okrsku Kochánovské pláně, podokrsku Javorensko-vysockého hřbetu ve vysoké části – IB-1A1a2 (Balatka, Kalvoda 2006). Díky návětrné poloze je zde pozorován nejvyšší dlouhodobý průměrný roční úhrn srážek ze všech českých lokalit, a to 1007 mm (viz příloha 1). Dle Quitta (1971) patří do chladné oblasti CH7 (AOPK 2020). Dominantním půdním typem jsou kambizemní podzoly. Celá oblast spadá do Šumavského bioregionu (1.62). Potenciální vegetací jsou zejména květnaté bučiny a květnaté jedliny. V okolí jsou významná rašeliniště i vrchoviště, případně primární bezlesí. Na vhodných stanovištích jsou zachovány reliktní bory, mezi které spadá i studovaná lokalita (Culek a kol. 2013).

#### 5.4. Prácheň

Lokalita PRA se nachází v PR Prácheň (vyhlášena již v roce 1953) v zázemí Horažďovic. Studovaný porost se zde vyskytuje na západně orientovaných svazích s příkře skloněnými plochami (Demek a kol. 1987) tyčících se až 100 m nad Otavu, která PR na Z ohraničuje (GISAT 2007). Podloží tvoří moldanubické krystalinikum, kdy se pod přirozeným borem nalézá zejména granodiorit (Zahradnický, Mackovčín 2004). Geomorfologicky lokalita spadá do podokrsku Kozlovské pahorkatiny, náležící k okrsku Prácheňská pahorkatina, podcelku Bavorovská vrchovina v rámci Šumavského podhůří (IB-2F2a). Těsně však sousedí s celkem Blatenská pahorkatina ležící na S od lokality (Balatka, Kalvoda 2006). Z důvodu polohy ve slabém srážkovém stínu je lokalita relativně suchá. V dlouhodobém průměru za rok naprší 584 mm (viz příloha 1). Zároveň je zde podnebí poměrně teplé, dle Quitta (1971) leží v mírně teplé oblasti MT5 (mírně chladná zima s normálním až krátkým létem), severně však nedaleko leží teplejší zóna MT7 (AOPK 2020). Půdy jsou zde kyselé a odpovídají dystrické či typické kambizemi (Zahradnický, Mackovčín 2004). Prácheň náleží do Sušického bioregionu (1.42) s relativně pestrou biotou, která je mj. odrazem velkého množství „ostrovů“ s vápencovým podložím (Culek a kol. 2013).

#### 5.5. Zbečno

Lokalita ZBE leží mezi obcemi Zbečno a Křivoklát v povodí bezejmenného potoka, který se ze S vlévá do Berounky. Náleží do CHKO Křivoklát (vyhlášena v roce 1978), která se v dané oblasti rozprostírá zejména na proterozoických a paleozoických vyvřelinách,

např. břidlicích a drobech (Ložek a kol. 2005). ZBE se v závislosti na své poloze vzhledem k údolí bezejmenného potoka nachází dle kategorizace Demka a kol. (1987) na mírně (dále a spíše nad údolím) až značně skloněných plochách (údolní svahy). Orientace svahů odběrných ploch je převážně J (GISAT 2007). Balatka, Kalvoda (2006) lokalitu označují kódem VA-3B1, jde tedy o okrsek Klíčavská pahorkatina, podcelek Lánská pahorkatina, celek Křivoklátská vrchovina ležící v Brdské oblasti Poberounské subprovincie. Místní podnebí spadá do mírně teplé oblasti MT11 (AOPK 2020) s dlouhým, teplým a suchým létem (Quitt 1971). V kombinaci s převážně J orientací a polohou v částečném srážkovém stínu (Ložek a kol. 2005) je lokalita náchylná k nedostatku vody. Projevy sucha v posledních letech patrně přispěly k defoliaci stromů, kvůli které některé jedince nebylo možné zahrnout do vzorkování. Půdní kryt je relativně homogenní s převahou nasycených typických kambizemí. Lokalita spadá do Křivoklátského bioregionu (1.19). Vzhledem k suchosti klimatu je bioregion relativně hodně zalesněný, vyskytuje se zde však i xerothermní vegetace, např. trávničky (Culek a kol. 2013). Studovaný porost je pravděpodobně výsledkem umělé výsadby, se kterou se zde začalo již na konci 18. století. Přirozeně by zde totiž rostl listnatý les s převahou dubohabřin či lipových bučin (Ložek a kol. 2005).

## 5.6. Dívčí kámen

Lokalita Dívčí kámen (*DIK*), jenž je součástí CHKO Blanský les, leží ve stejnojmenné PR na SZ od zříceniny gotického hradu Dívčí Kámen. Celkově se sice nachází východněji než některé lokality z oblasti Českého Švýcarska (*PRAVBR\_K* a *PRAVBR*, viz dále), ale z důvodu nerozdělování zmíněného regionu je zařazen popis *DIK* nyní. Lokalita se nalézá na skalním ostrohu sevřená kaňonovitými údolími Vltavy a Křemže (Culek a kol. 2013). Na Z podklad tvoří kompaktní granulitový masiv, blíže soutoku zmíněných řek je skalní hřbet tvořen rulami a ortorulami (Albrecht a kol. 2003). Místní reliéf je různorodý co do orientace (převaha J až V), tak sklonitosti, kdy se podle kategorizace Demka a kol. (1987) rozkládá na mírně skloněných až velmi příkře skloněných plochách (GISAT 2007). Geomorfologickou taxonomií *DIK* náleží k IB-4A1a, tedy podokrsku Korosecká vrchovina, okrsku Velešínská pahorkatina, podcelku Kaplická brázda v rámci celku Novohradské podhůří, nicméně přímo hraničí s okrskem Křemžská kotlina, který spadá pod sousední celek Šumavské podhůří (Balatka, Kalvoda 2006). Podle Quitta (1971) se nachází v mírně teplé oblasti s normálním až krátkým létem MT5. Avšak v okruhu 2 km od lokality se nachází další 3 oblasti, což svědčí o relativně významném klimatickém gradientu. Konkrétně jde ze Z o CH7 přecházející v MT3 a na V od lokality pak dále navazuje nejteplejší z mírně teplých rajónů MT11 (AOPK 2020). *DIK* spadá

do Českokrumlovského bioregionu označeného 1.43 (Culek a kol. 2013). V místech, kde skalní podloží vystupuje na povrch či do jeho blízkosti se vyvinuly typické rankery, v příznivějších polohách se pak vyskytuje chudá kyselá kambizem. Jedná se o lokalitu, kde většinou roste reliktní bor a jakékoliv hospodářské zásahy zde nejsou povoleny. Albrecht a kol. (2003) uvádí, že zde borovice dosahuje věku až 170 let. Při terénním výjezdu v rámci této DP se však povedlo odebrat vzorek z jedince, jehož věk přesahuje 250 let. Ostatní stromy však byly výrazně mladší.

## 5.7. České Švýcarsko

Z NP České Švýcarsko pochází celkem 7 lokalit, které jsou kvůli své blízkosti a velmi podobným FG poměrům popsány dohromady. Konkrétně se jedná o *PRAVBR\_K*, *PRAVBR*, *VILSTEN\_K*, *VILSTEN*, *RUZZAHR*, *RUZ* a *RUZZAHR\_K*. Lokality leží na hrubozrnných křemenných pískovcích, tedy sedimentech uložených deltami do mělkého moře České tabule v období křídý (Uličný, Laurin 2007). Geomorfologicky spadají do podcelku Jetřichovické stěny, která náleží k celku Děčínská vrchovina v rámci oblasti Krušnohorské hornatiny, kódem IIIA-3B (Balatka, Kalvoda 2006). Pro celou krajinu je významný pískovcový fenomén (Ložek 2007), jehož součástí jsou unikátní tvary reliéfu. Například vzorky z *PRAVBR\_K* a *PRAVBR*, pochází z okolí Pravčické brány, která je se svou výškou 16 m největší skalní branou v Evropě (Bína, Demek 2012). Lokality zpravidla leží na skalnatých příkře až velmi příkře skloněných plochách. Pouze kontrolní lokality (s kódem končícím „\_K“) se nachází na mírně až značně skloněných plochách (Demek a kol. 1987). Převládající orientace je J (GISAT 2007). Členitý pískovcový reliéf se projevuje i na variabilitě klimatu. Západní lokality v okolí Pravčické brány spadají do teplé oblasti T2 s dlouhým, teplým a suchým létem. Podnebí ostatních lokalit klasifikuje Quitt (1971) jako mírně teplé (MT7). V nedalekém okolí se vyskytuje rajón MT9 a také relativně chladnější zóny MT4 a MT2 (AOPK 2020). Na chudém substrátu vznikly arenické podzoly střídající se se silně kyselými arenickými kambizeměmi. Na skalních lokalitách se vyskytuje typická litozem doplněna o oligotrofní rankery. Děčínský bioregion (1.32), kam území spadá, se vyznačuje vysokou geodiverzitou a je převážně pokryt lesy. Z nich převažují kulturní jehličnaté porosty, ale na vhodných stanovištích se vyskytují právě i typické reliktní bory (Culek a kol. 2013), na kterých byla odebírána data vstupující do této DP.



## 5.8. Kokořínsko

Největší popisovaná skupina zkoumaných lokalit leží v CHKO Kokořínsko vyhlášené v roce 1976. Konkrétně sem patří *PODVLH*, *TISKAM*, *MALAVLH*, *KOS\_S*, *KOS*, *SUPHOR*, *SUPHOR\_K* a *VYSVRCH*. Svou geologickou stavbou je Kokořínsko velmi podobné Českému Švýcarsku, kdy v podloží převládají druhohorní pískovce jizerského souvrství tvořící erozně-denudační reliéf s hustou sítí kaňonovitých údolí (Bína, Demek 2012). Relativně homogenní pískovcový podklad je na některých částech (například v okolí vlhošťských lokalit *PODVLH* a *MALAVLH*) narušen intruzí magmatu třetihorního vulkanismu (Ložek a kol. 2005). Všechny lokality spadají pod různé podokrsky a části geomorfologického okrsku Polomené hory v podcelku Dokeská pahorkatina, jež je součástí celku Ralská pahorkatina v oblasti Severočeské tabule, kódově se tedy území značí VIA-1A (Balatka, Kalvoda 2006). Sklon reliéfu jednotlivých lokalit se velmi různí, dle Demka a kol. (1987) nabývá kategorií od rovinných ploch (zejm. u kontrolních lokalit jako je např. *MALAVLH* či *SUPHOR\_K*) po velmi příkře skloněné plochy (*PODVLH*). Orientace svahů v místě odběrů je většinou J až Z, výjimkou ale není ani úklon na V jako v případě *SUPHOR\_K* (GISAT 2007). Lokality na S a V (*PODVLH*, *TISKAM*, *MALAVLH* a *VYSVRCH*) náleží podle Quitta (1971) k mírně teplé oblasti MT7, ostatní lokality k relativně teplejší mírně teplé oblasti s delším létem MT9 (AOPK 2020). SZ území je zároveň nepatrně deštivější (zejm. v zimních měsících), dlouhodobý roční rozdíl je však zanedbatelných 16 mm (viz příloha 1). Převládajícím půdním typem jsou arenické kambizemě, které ve vyšších a severně orientovaných polohách mohou přecházet až do arenických podzolů. V místech výskytu spraší se vytvořily luvizemě či hnědozemě. Oblast spadá do Kokořínského bioregionu (1.33), pro který je charakteristická teplomilná pískovcová biota s inverzemi na dnech kaňonovitých údolí a roklí. Více jak polovinu rozlohy CHKO zaujímají lesy, kde se přirozené bory vyskytují na horních hranách kaňonů a skalních stěn (Culek a kol. 2013). Podrobnější popis jednotlivých lokalit nabízejí Lehečková (2013) a Mašek (2019).

## 5.9. Adršpach

Lokalita (*ADR*) se vyskytuje v rámci CHKO Broumovsko, konkrétně v NPR Adršpašsko-teplické skály, což je největší skalní město ve střední Evropě (Bína, Demek 2012). Geologický vývoj byl obdobný jako v případě Kokořínska nebo Českého Švýcarska, podklad tedy tvoří křemičité pískovce ze svrchní křídly. Vznik skalního města byl umožněn mnohačetnými tektonickými poruchami tabulové plošiny, na které se vyvinulo. Skalní věže a mnoho dalších pískovcových tvarů jsou rozděleny hlubokými soutěskami

a kaňony, kdy jejich vzájemné převýšení dosahuje i přes 100 m (Faltysová a kol. 2002). Samotné místo odběru leží na značně až příkře skloněných plochách (Demek a kol. 1987) a svahy jsou zde převážně orientovány k SZ až SV (GISAT 2007), kdy se jedná o oblast skalních věží nad soutokem Metuje a Skalního potoka. Dle geomorfologického členění Balatky, Kalvody (2006) lokalita spadá pod Orlickou oblast celku Broumovská vrchovina, podcelek Polická vrchovina, okrsek Polická pánev, podokrsek Teplická pánev a část Adršpašsko-teplické skály (IVB-1B3a1). Klimaticky se území řadí k chladné oblasti CH7 (AOPK 2020), tedy rajónu s velmi krátkým až krátkým, mírně chladným a vlhkým létem (Quitt 1971). Podobně jako u předchozích lokalit se i zde vyskytují arenické podzoly, případně litozemě. ADR přísluší k Broumovskému bioregionu 1.38 (Culek a kol. 2013) a celé NPR je pokryto souvislými lesy. Z důvodů historických zásahů je současně nejrozšířenějším druhem smrk (asi ze ¾) na úkor buku a jedle. Potenciální přirozenou vegetací představuje formace (sub)montánního smrkového boru a smrčín na balvanitých rozpadech (Faltysová a kol. 2002).

## 5.10. Suchý vrch

Lokalita SUC leží na Z svahu stejnojmenné hory v PR Suchý vrch. Geologicky se jedná o zajímavé území na sutích devonských křemenců (Culek a kol. 2013). Ty zde tvoří kamenná moře, na kterých je rozvolněná vegetace. Demek a kol. (1987) místí reliéf klasifikují jako značně až příkře (na výjimky velmi příkře) skloněný (GISAT 2007). Geomorfologicky území spadá do okrsku Hornoopavské hornatiny, která náleží k podcelku Mědvědská hornatina, celku Hrubý Jeseník v oblasti Jesenické podsoustavy, kódově IVC-7B (Bína, Demek 2012). Podle Quittovy (1971) klasifikace se lokalita nachází v chladné oblasti CH6 s krátkým až velmi krátkým, mírně chladným a vlhkým až velmi vlhkým létem, avšak v bezprostřední blízkosti se nalézá i relativně chladnější klima CH4 a současně i relativně teplejší CH7 (AOPK 2020). Vyskytují se zde málo vyvinuté půdní typy jako rankery či litozemě, většinou s vysokým obsahem skeletu (Šafář a kol. 2003). Území je součástí Jesenického bioregionu – 1.70 (Culek a kol. 2013). Šafář a kol. (2003) tvrdí, že vrch je zalesněný pouze z 15 %, kdy se ve vrcholové části vyskytuje právě reliktní bor s příměsí břízy, případně modřínu. Porost se zde musel adaptovat nejen na extrémní přírodní podmínky (chudé půdy, exponovanost vůči silným větrům), ale zároveň je poškozen imisemi (Šafář a kol. 2003).

## 5.11. Velká Fatra

Následující popis se věnuje lokalitám *VFTMA* a *LUB*. Obě leží na svazích údolí Lubochňanky, která odvodňuje severní část NP Velká Fatra. Geologické podloží tohoto pohoří tvoří odolné krystalické horniny (zejm. žula), významnou roli i pro současnou podobu georeliéfu však hrají druhohorní vápence a dolomity (NP Velká Fatra 2020). Ty zde tvoří příkrovovou stavbu a projevují se zejména v centrální a jižní části pohoří, kde je četný výskyt krasových tvarů. Díky této stavbě se jedná o nejrozsáhlejší vápencové pohoří na Slovensku (Škodová, Mazúrek 2012). Povrch je značně členitý, dle Demka a kol. (1987) se lokality nachází zejména na velmi příkře skloněných plochách, přítomny jsou ale i srázy se sklonem nad 35°. *VFTMA* leží SZ od hory Tmavá na svazích se Z orientací a jedná se o nejvýše položenou zkoumanou lokalitu. *LUB* se nalézá o dost níže, již mimo hranice samotného NP. Rozprostírá se na V až JV orientovaném svahu nad obcí Lubochňa (GISAT 2007). Podle geomorfologického členění Mazúra, Lukniše (1986) cit. v Miklós a kol. (2002) spadá zájmové území do celku Velká Fatra v rámci Fatransko-tatranské oblasti v subprovincii Vnitřní Západní Karpaty. Konkrétně se *VFTMA* nachází v podcelku Hôľna Fatra, *LUB* v podcelku Šipska Fatra. Miklós a kol. (2002) řadí obě lokality do chladné klimatické oblasti C1 (*LUB* leží na hranici s mírně teplou oblastí M7). Tato klasifikace sice vychází z práce Quitta (1971), ale je pozměněná (např. nižší čísla ve Quittově klasifikaci znamenají chladnější stupeň, v dané slovenské kategorizaci je to naopak). Srovnání příslušnosti ke klimatickým oblastem je tedy mezi Českem a Slovenskem problematické, proto je nejlepší se orientovat podle klimadiagramů v příloze 1. V závislosti na poloze v rámci svahů a nadmořské výšce se v zájmovém území vyskytují různé půdní typy, většinou však rendziny a kambizemě, ty zejména dystrikové. Dalším skupinou jsou různé subtypy podzolů (Miklós a kol. 2002). Fytogeografické členění se v zásadě shoduje s geomorfologickým. Lesy v tomto NP zabírají více než 70 % povrchu, kdy mají porosty v rámci hojně zastoupených skalních biotopů často reliktní charakter (Škodová, Mazúrek 2012).

## 5.12. Slovenský ráj

Poslední dvě studované lokality leží v NP Slovenský ráj. Západnější *TRIKP* se nachází na V až JV úbočí hory Tri kopce. Lokalita *LET* se tyčí nad řekou Hornád na svazích s převážně S orientací (GISAT 2007). Oba porosty rostou Demka a kol. (1987) na velmi příkře skloněných plochách, obdobně jako je tomu u předchozích slovenských stanovišť. Taková podobnost členitosti georeliéfu není náhoda, oblast Slovenského ráje totiž taktéž

vznikla na druhohorních vápencích a dolomitech. Selektivním zvětráváním a následnou erozí vznikl systém vysoko položené krasové planiny protkané hluboko zaříznutými kaňony protékajících řek ([Škodová, Mazúrek 2012](#)). Geomorfologicky území spadá do stejné subprovincie (Vnitřní Západní Karpaty), konkrétně do oblasti Slovenské rudohorie, celku Spišsko-gemerský kras a podcelku Slovenský raj ([Mazúr, Lukniš 1986](#) cit. v [Miklós a kol. 2002](#)). Klimaticky celé území řadí [Miklós a kol. \(2002\)](#) do mírně chladné oblasti C1. Avšak při srovnání klimadiagramů daných míst (příloha 1) je zřejmé, že lokality ve Slovenském ráji mají výrazně nižší srážkové dotace a trochu vyšší průměrné teploty než v případě Velké Fatry. Zdaleka nejrozšířenějším půdním typem jsou rendziny zastoupené různými subtypy, zejména jde o rendziny kambické ([Miklós a kol. 2002](#)). Z hlediska bioty je NP Slovenský raj významnou oblastí, vyskytuje se zde řada endemitů a glaciálních reliktních druhů ([Škodová, Mazúrek 2012](#)). Téměř 90 % plochy zaujímají lesy, mezi nimiž se roztroušeně vyskytují vzácné reliktní a původní nenarušené porosty ([NP Slovenský raj 2020](#)).

## 6. MATERIÁL A METODIKA

### 6.1. Dendrochronologická data

#### 6.1.1. Primární data

Čas odběru i původ vzorků se různí. Do práce jsou zahrnuta data z některých starších závěrečných prací v rámci KFGG PřF UK. Tou první je DP [Lehečkové \(2013\)](#), ze které vstupují do současné práce data z lokalit *PODVLH*, *TISKAM*, *MALAVLH*, *SUPHOR*, *SUPHOR\_K* a *VYSVRCH*. [Mašek \(2019\)](#) poskytl data z *KOS\_S* a *KOS*. Vyjma lokality *RUZ* pochází data z oblasti Českého Švýcarska z roku 2013 od Friedlové (odběr a měření Z. Friedlovou). Vzorky a z nich zpracovaná data z lokalit *SUBRE*, *SUC* a *VFTMA* pochází z FLD ČZU. Důvodem je fakt, že předkládaná DP je součástí GAČR projektu (identifikátor GA19-13807S) „*Snižuje rostoucí koncentrace CO<sub>2</sub> citlivost evropských temperátních jehličnanů vůči suchu?*“. Data z ostatních lokalit byla autorem odebrána v letech 2019 a 2020, který je zároveň laboratorně zpracoval a připravil k dalšímu použití (viz tabulka 1).

#### 6.1.1. Odběr vzorků

Všechny vzorky byly odebrány z živých stromů pomocí přírůstového (někdy též Presslerova) nebo zezu. Jedná se o dutý vrták, s jehož pomocí se nejčastěji ve výšce prsou (cca 1,3 m) odebere kolmo na osu kmene válec dřeva zpravidla o průměru 5 mm ([Speer 2010](#)), viz obrázek 9 níže. Až na výjimky (např. *KOS* a *KOS\_S*, podrobnosti viz [Mašek \(2019\)](#)) byly vybírány dominantní, či sub-dominantní jedinci, u kterých byla nejnižší pravděpodobnost ovlivnění jejich růstových parametrů vnějšími faktory porostu, například kompeticí. Pro dosažení co nejdelších sérií byly vzorky odbírány pouze ze vzrostlých stromů s co největším obvodem kmene, u nichž byl předpoklad nejvyššího věku nebo ze stromů vizuálně starších ([Cook, Kariukstis 1990](#)). Vedle odběru samotných vzorků se u každého stromu zaznamenával průměr kmene ve výšce prsou – tzv. DBH (z anglického *diameter at breast height*), případně další poznámky popisující daného jedince. Přestože někteří autoři doporučují odbírat z každého stromu automaticky dva vzorky ([Speer 2010](#)), v případě odběrů pro tuto DP šlo většinou jen o jeden vývrt. Zato počet vzorkovaných jedinců z jedné lokality byl v průměru vyšší, než někteří autoři doporučují. Např. [Cook, Kariukstis \(1990\)](#) uvádí, že 20–30 stromů je dostatečný počet pro dendroklimatické studie. Průměrný počet sérií na jedné lokalitě v této DP je však 39 (viz tabulka 2).

**Tabulka 1:** Přehled lokalit se souřadnicemi a údaji o sběru a zpracování dat.

Lokalita	Poloha [XX,XX s. š., YY,YY v. d.]	Odběr vzorků	Zpracování vzorků
PLU	50,0552425N, 12,7760414E	autor (spoluúčast)	autor
RAB	50,0436742N, 13,2968353E	autor (spoluúčast)	autor
SUBRE	49,1510936N, 13,4138831E	FLD ČZÚ	
PRA	49,3160817N, 13,6807514E	autor (spoluúčast)	autor
ZBE	50,0571744N, 13,9032572E	autor	autor
DIK	48,8905764N, 14,3547992E	autor	autor
PRAVBR_K	50,8826100N, 14,2789500E	Z. Friedlová	
PRAVBR	50,8843500N, 14,2810900E	Z. Friedlová	
VILSTEN_K	50,8565200N, 14,3999900E	Z. Friedlová	
VILSTEN	50,8638217N, 14,4044900E	Z. Friedlová	
RUZZAHR	50,8900800N, 14,4109700E	Z. Friedlová	
RUZ	50,8896831N, 14,4129669E	autor (spoluúčast)	autor
RUZZAHR_K	50,8877394N, 14,4210203E	Z. Friedlová	
PODVLH	50,5994469N, 14,4488281E	E. Lehečková	
TISKAM	50,5788733N, 14,4531464E	E. Lehečková	
MALAVLH	50,5946447N, 14,4566225E	E. Lehečková	
KOS_S	50,5726650N, 14,4559870E	J. Mašek	
KOS	50,5672822N, 14,4584822E	J. Mašek	
SUPHOR	50,4881142N, 14,5278136E	E. Lehečková	
SUPHOR_K	50,4906531N, 14,5293933E	E. Lehečková	
VYSVRCH	50,5289333N, 14,5890108E	E. Lehečková	
ADR	50,6033069N, 16,1156317E	V. Trembl	autor
SUC	50,1562303N, 17,3452503E	FLD ČZÚ	
VFTMA	48,9987458N, 19,1486103E	FLD ČZÚ	
LUB	49,1225800N, 19,1626700E	Dendro tým PřF	autor
TRIKP	48,9360900N, 20,3111000E	Dendro tým PřF	autor
LET	48,9532800N, 20,4412800E	Dendro tým PřF	autor

**Obrázek 9:** Ukázka odběru vzorku v terénu přírůstovým nebozezem (lokalita *DIK*).



**Zdroj:** archiv autora



Na obrázku 9 je vidět, že vrtaný jedinec nemá vzrostný vrchol rostoucí přímo vzhůru. Taková situace není ideální a pokud je to možné, obdobné stromy se nevzorkují. V tomto případě byl však daný strom zahrnut do sběru dat z důvodu omezeného množství starých jedinců na stanovišti.

Po každém použití nebo zezu se odebrané vývrtky v terénu popisují a ukládají tak, aby nedošlo k jejich poškození nebo záměně. Zde bylo postupováno dle doporučení [Speera \(2010\)](#), kdy unikátní kód tvořily tři písmena (označující lokalitu) a dvě číslice (označující číslo stromu). K uložení vývrtů pro jejich bezpečnou manipulaci a přepravu byly využity desky s připravenými popsány drážkami z papírové lepenky, stejně jako popisuje např. [Kyncl \(2017\)](#), viz ilustrační obrázek 10 níže.

**Obrázek 10:** Desky pro přepravu vzorků a notes s údaji o DBH a dalšími poznámkami (lokalita *PLU*).



**Zdroj:** archiv autora

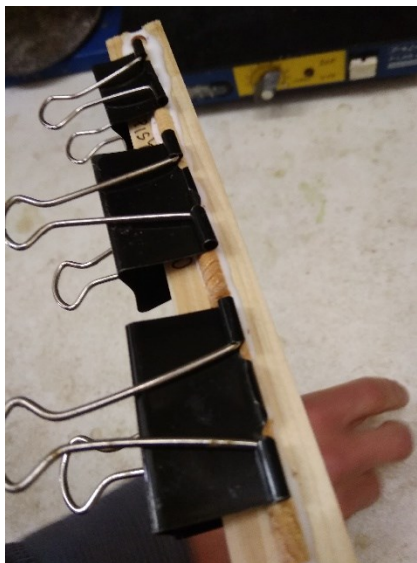
### 6.1.2. Příprava vzorků

Předtím, než mohly být měřeny šířky jednotlivých letokruhů, bylo potřeba všechny vzorky k tomuto úkonu připravit. Standardní postup se sestává ze třech hlavních částí: 1) vysušení, 2) nalepení a 3) zbroušení vývrtů ([Speer 2010](#)).

První krok je velmi jednoduchý a v našich klimatických podmínkách spočívá v prostém ponechání vzorků po nějakou dobu (alespoň několik dní) při pokojové teplotě. Práce se suchými vývrtky zajistí, že po nalepení vzorků dřevo nepraská tím, jak ztrátou vody zmenšuje svůj objem ([Speer 2010](#)).

Pro lepší manipulaci s vývrty je posléze potřebné vzorky nalepit ke stabilnímu podkladu. V tomto případě byly využity 2 cm široké a 40 cm dlouhé dřevěné lišty s kulatou drážkou v místě podélné osy, viz obrázek 11 níže. Do ní se vývrty vkládají tak, aby při pohledu shora odpovídaly příčnému řezu (viz obrázek 1). Kdyby orientace vzorků byla jiná, hrozila by obtížná či nemožná identifikace hranic letokruhů, zejména úzkých ([Speer 2010](#)).

**Obrázek 11:** Lepení vzorků do lišt a jejich fixace kovovými klipy po dobu tvrdnutí lepidla.



**Zdroj:** archiv autora

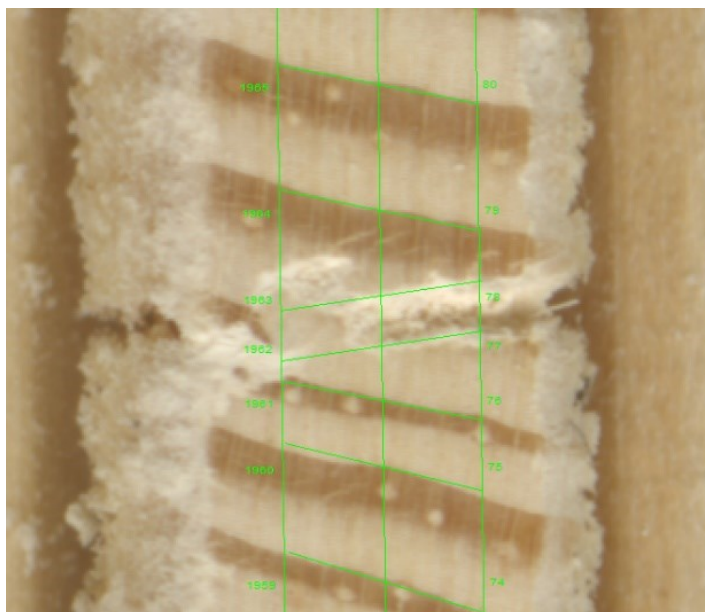
Zbroušení vývrtů slouží k co největšímu zvýraznění letokruhových hranic. V tomto případě byla použita série brusných papírů se zrnitostí mezi 80 až 600 – hodnota udávající velikost a počet brusných zrn. Broušení hrubšími papíry (nižší hodnota zrnitosti) bylo provedeno pomocí pásové brusky, po kterém následovalo finální ruční dobroušení nejjemnějším papírem.

### 6.1.3. Měření a analýza šířek letokruhů

Vzorky připravené k měření byly naskenovány s vysokým rozlišením (1200 DPI). Skener byl propojen se softwarem WinDENDRO, který za použití počítače umožňuje poloautomatické měření šířek letokruhů ([Regent Instruments 2019](#)). V tomto prostředí byla vizuálně zkontrolována každá letokruhová hranice detekovaná programem a v případě potřeby byly tyto hranice manuálně opraveny. Vedle toho bylo zapotřebí zaznamenat pozici jakýchkoliv jevů zkreslujících reálnou šířku letokruhů. Příkladem je třeba „prasklina“, která šířku uměle zvyšuje (viz obrázek 12 níže). Tyto anomálie byly odstraněny v dalším kroku.



**Obrázek 12:** Příklad měření šířek letokruhů v programu WinDENRO s ukázkou praskliny (hranice označeny čísly 77 a 78), několikanásobné zvětšení.



**Zdroj:** [Regent Instruments 2019](#), archiv autora

Série šířek letokruhů z prostředí WinDENRO bylo následně zapotřebí přesně datovat. K tomu byla použita metoda křížového datování, které bylo provedeno v programu PAST 4 ([SCIEM 2018](#)), a to pomocí shody extrémních letokruhů a shody trendů vyjádřené pomocí t-testů, datovacího indexu a indexu souběžnosti (německy *gleichläufigkeit*). Vznikly tak přesně datované finální letokruhové křivky (očištěné o vlivy případných chybějících letokruhů nebo letokruhových sekvencí končících dříve než v roce odběru), které posloužily jako vstupní primární data do dendrochronologických analýz.

## 6.2. Klimatická data

Druhým stěžejním souborem dat vstupujících do výpočtů a analýz byla klimatická data. Původ i délka časových řad se lišil na úrovni států.

### 6.2.1. Česko

Pro území Česka data pocházejí ze stanic ČHMÚ a byla interpolována z tuzemských stanic přímo pro zkoumané lokality se zohledněním teplotních gradientů (v případě více lokalit v jedné oblasti reprezentují klimatická data všechny dané lokality, viz příloha 1). Konkrétně se jedná o časové řady průměrných teplot a úhrnů srážek v měsíčním kroku

v období 1901–2019. Pro potřeby dalších analýz bylo zapotřebí ještě dopočítat (ve stejném kroku i časovém období jako teploty a srážky) tzv. standardizovaný srážkový evapotranspirační index (anglicky *Standardised Precipitation Evapotranspiration Index*), krátce SPEI ([Vicente-Serrano a kol. 2010](#)). K jeho kalkulaci došlo v programu R ([R Core Team 2019](#)) za použití balíku *SPEI*. Pro výpočet potenciální evapotranspirace v rámci SPEI byla použita Thorntwhaitova rovnice pro 50. rovnoběžku. Uvažované časové okno pro výpočet SPEI bylo 5 měsíců (4 předchozí + daný měsíc), pro více informací viz [Beguería, Vicente-Serrano \(2017\)](#).

### 6.2.2. Slovensko

Časové řady reprezentující slovenské lokality byly poskytnuty Slovenským hydrometeorologickým ústavem (SHMÚ) a pochází z následujících stanic: z Oravské Lesné v případě lokalit *VFTMA* a *LUB*, resp. z Popradu v případě *TRIKP* a *LET*. Obě stanice provádí kontinuální měření od roku 1951. Poskytnutá data v případě Oravské Lesné končí rokem 2013. U stanice Poprad sice byla dodána měření do roku 2018, ale vzhledem k množství chybějících údajů mezi r. 2014–2018 (784 denních záznamů), byla do dalších výpočtů zahrnuta jen kompletní data do r. 2013.

Za účelem prodloužení řad byly staniční hodnoty regresně doplněny na základě gridových hodnot z klimatické databáze Climatic Research Unit (CRU). Byl zvolen grid s nejvyšším dostupným rozlišením, které je 0,5°. Interpolovaná data pro stanici Oravská Lesná pochází ze čtverce se souřadnicemi 49°–49,5° s. š., 19°–19,5° v. d., v případě Popradu se jedná o čtverec 49°–49,5° s. š., 20°–20,5° v. d. Jen pro doplnění, pro sledované období byla do interpolace dat pro čtverec Oravské Lesné zahrnuta teplotní měření z 25 různých meteostanic, srážková měření pak z 9 stanic. V případě Popradu šlo o stejný počet stanic u srážkových dat, naměřené teploty pak pochází z 22 stanic ([Harris a kol. 2014](#)).

Pro prodloužení teplotních řad byla použita metoda lineárního regresního modelu. Výsledky byly u teplot uspokojivé, koeficient determinace  $R^2$  neklesl pod 0,88 (červen pro stanici Poprad). Avšak v případě srážek tento koeficient nenabýval požadovaných hodnot (např. u Oravské Lesné v měsíci červnu vyšel  $R^2$  pouze 0,26), což mělo za následek, vedle značné nejistoty, vysokou ztrátu variability v modelovaném období. Proto byla pro výpočet srážek použita metoda škálování. Při té byla CRU data naškálována na naměřená tak, aby měla stejný průměr a směrodatnou odchylku, více viz rovnice 7 níže.

**Rovnice 7:** Výpočet srážek pro slovenské lokality mezi 1901–1951 pomocí škálování.

$$M^t = M_{\bar{p}} + (M_{CRU}^t - M_{\overline{CRU}}) \times (M_{\sigma p} \div M_{\sigma CRU})$$

kde  $M$  = vybraný měsíc,

$p$  = pozorovaná (staniční) data,

$CRU$  = interpolovaná data z CRU,

$\bar{p} / \overline{CRU}$  = průměr pozorovaných (staničních) dat / interpolovaných dat z CRU,

$\sigma$  = směrodatná odchylka,

$t$  = daný rok.

### 6.3. Analýza extrémních propadů růstu

Analýza se skládá z několika hlavních částí, které jsou popsány v následujících podkapitolách. Většina výpočtů byla provedena v prostředí R ([R Core Team 2019](#)), v programu Microsoft Excel 365 ([Microsoft 2020](#)), případně jejich kombinací.

#### 6.3.1. Chronologie Cropperových hodnot

Za použití balíku *dpIR* ([Bunn a kol. 2020](#)) byl nejprve ze sérií z jednotlivých lokalit odstraněn věkový trend. K tomu byla použita funkce kubický spline s velikostí okna 50 let a letokruhovými indexy počítanými jako podíly. Z takto detrendovaných sérií byly následně vypočteny C values pro každý rok za použití metody normalizace v plovoucím okně tak, jak doporučuje [Jetschke a kol. \(2019\)](#) – délka plovoucího okna byla nastavena na 13 let, více viz kapitola 3.2.1. Ze vzniklých sérií C values byly následně vytvořeny stanovištní chronologie reprezentované mediánem těchto hodnot. Série byly do chronologie zahrnuty v daném roce pouze v tom případě, kdy jich bylo alespoň 5 (tedy roky reprezentované pouze 4 a méně vzorky nejsou v chronologiích obsaženy).

#### 6.3.2. Dendroklimatická analýza

Negativní hodnoty C values byly vysvětlovány korelační analýzou těchto hodnot s klimatickými proměnnými. Konkrétně šlo o průměrné měsíční teploty, měsíční úhrny srážek a měsíční průměry SPEI. Korelace byla počítána v intervalu od předchozího června do září daného roku. Vyjma dat v měsíčním kroku byly s C values taktéž korelovány 1) průměry SPEI ve vrcholu vegetační sezony (tj. předchozí červen–

předchozí srpen a současný červen–současný srpen) a 2) sumy srážkových úhrnů v období současný květen–současný srpen.

### 6.3.3. Klastrová analýza

Pro určení geografických zákonitostí rozložení extrémních snížení růstu v nejextrémnějších růstových letech byla zvolena metoda klastrové analýzy. Nejprve bylo potřeba si definovat nejextrémnější růstové roky. Výběr byl tvořen z let, ve kterých byly dostupné hodnoty C values z alespoň 10 lokalit. Takových roků bylo 172, a to mezi 1841–2012. Z těchto let se vybralo (arbitrárně zvolených) 10 % nejextrémnějších let, které byly následně označeny jako PYs. Jako výběrové kritérium byla zvolena velikost mediánu vypočteného z třetiny nejnižších mediánů C values z jednotlivých lokalit. Třetina nejnižších mediánů byla zvolena jako kompromis mezi snahou odfiltrovat na jedné straně roky, kde se extrémní propad v růstu objevil jen u jedné či několika málo lokalit, a na straně druhé ty roky, u kterých sice většina lokalit vykazovala negativní C values, ale tyto záporné hodnoty nebyly výrazné (extrémní). Nutno však podotknout, že v případě výpočtu nejextrémnějších let na základě nejnižšího mediánu všech C values (nikoliv nejnižší třetiny), by se finální výčet těchto let (viz kapitola 7.4.) lišil pouze dvěma roky – místo let 1934 a 1893 by zahrnoval roky 1876 (11. místo) a 1858 (14. místo).

Pro samotnou klastrovou analýzu byla v R ([R Core Team 2019](#)) zvolena Wardova metoda za použití euklidovské vzdálenosti, a to konkrétně typ „*ward.D2*“ operující s neumocněnými vzdálenostmi, které byly v tomto případě použity ([Murtagh, Legendre 2014](#)). Vzhledem k tomu, že do výpočtů vstupovaly C values, což jsou ze svého principu výpočtu normalizované hodnoty, nebyla tato data dále upravována (např. škálováním nebo centrováním). Původním záměrem bylo klastrovat lokality v extrémních letech na základě C values jednotlivých stromů, to však kvůli závislosti vstupních dat na pořadí a proměnlivému počtu sérií v různých lokalitách nebylo možné. Proto byly lokality nakonec klastrovány na základě mediánu a 1. a 3. kvartilu odpovídajících C values.

Vedle klastrování extrémních růstových roků byla provedena i obecná klastrová analýza, do které vstupovaly řady mediánů C values všech lokalit mezi léty 1902–2004. V tomto období totiž byla k dispozici tato data za všechny lokality. U všech grafických výstupů v podobě dendrogramů je na vertikální ose (y) zobrazena tzv. nepodobnost. Ta znázorňuje vzdálenost (resp. odlišnost) mezi jednotlivými pozorováními, případně klastry ([Zhang a kol. 2017](#)). Čím je její hodnota vyšší, tím si jsou jednotlivá pozorování (lokality) či klastry méně podobné.

### 6.3.4. Regresní analýza

Prostorová interpolace extrémních snížení růstu byla provedena pro vybrané roky za pomoci lineárního regresního modelu. Do modelu vstupovaly na úrovni lokalit tyto proměnné: medián C value (vysvětlovaná proměnná), zeměpisná šířka (severnost), zeměpisná délka (východnost), nadmořská výška a produktivita prostředí (vše vysvětlující proměnné). Výpočet mediánu C values je popsán v kapitole 6.3.1., nadmořská výška a souřadnice lokalit byly odečteny při odběru vzorků z GPS lokátoru a/nebo z mapy. Kalkulace produktivity prostředí proběhla ve dvou krocích. Nejdříve byla vypočtena průměrná radiální šířka každého vzorkovaného jedince při dosažení věku 80 let. Produktivita prostředí dané lokality pak odpovídala průměru všech vypočtených průměrných šířek v předcházejícím kroku. Obecně měl tento ukazatel za cíl charakterizovat místní podmínky prostředí jednotlivých lokalit. Jelikož se jedná o komplexní ukazatel, bohužel se k němu nepodařil najít jiný analogický prvek, pro který by byla k dispozici prostorová data pro celé zájmové území. Z toho důvodu produktivita (pro kterou byly k dispozici jen bodové údaje reprezentující jednotlivé lokality) nebyla zahrnuta do prostorové regrese.

Regresní model má za cíl vysvětlit variabilitu závislé proměnné (odezvy) na základě chování nezávislé proměnné (regresoru), případně několika proměnných (Zvára 2013). Výběr analyzovaných roků byl tvořen z let, ve kterých byly dostupné hodnoty C values z alespoň 10 lokalit (1841–2012). Pokud se v některých z těchto let u jakékoliv lokality vyskytla alespoň jedna hodnota, která spadala do nejnižších 10 % všech hodnot v souboru, tento rok byl zahrnut do regresní analýzy. Takových let bylo celkem 98.

Samotná regresní analýza proběhla v několika krocích za použití balíku *oslrr* (Hebbali 2020). Nejdříve byl vypočten plný model zahrnující všechny proměnné. Arbitrárně zvolené hranice uspokojivých výsledků, které byly v dalších fázích prostorově interpolovány, byly zvoleny na základě dvou kritérií: adjustovaný koeficient determinace musel nabývat alespoň 0,4 ( $\text{Adj. } R^2 \geq 0,4$ ) a zároveň  $p$ -hodnota nesměla přesáhnout 0,001 ( $p \leq 0,001$ ). Často však mohou nastávat situace, kdy použití velkého počtu regresorů v modelu může vést k nemožnosti zamítnout nulovou hypotézu (v našem případě  $p > 0,001$ ). Jednou z metod dosažení optimální skupiny regresorů je využití tzv. postupného výběru (Hebák a kol. 2007). Následně bylo tedy statisticky zjišťováno, za použití jakého z druhů postupného výběru bude dosaženo nejlepších výsledků regresního modelu, jenž může být vysvětlován jen některými, případně jednou nezávislou proměnnou. Na základě literatury (Crowson 2020) a výpočtů v R byla jako nejlepší volba zvolena metoda krokové regrese (anglicky *stepwise regression*) za použití

tzv. Akaikeho informačního kritéria (AIC). Po provedení tohoto kroku se výsledný počet roků splňujících zvolená kritéria ( $\text{Adj. } R^2 \geq 0,4$ ,  $p \leq 0,001$ ) více než zdvojnásobil.

Pro všechny tyto roky byl následně nalezený vztah mezi hodnotami C values a regresory (vyjma produktivity) prostorově interpolován. Tato interpolace proběhla v prostředí ArcMap ([ESRI 2020](#)). Jako podkladové vrstvy posloužily tematické gridy (nadmořská výška, severnost a východnost) o velikosti pixelu 100x100 m. Data o nadmořské výšce pochází z digitálního modelu terénu o stejné velikosti pixelu jako tematické gridy ([GISAT 2007](#)). Gridy severnosti a východnosti byly vytvořeny v jednotném koordinačním systému pomocí funkcí *Raster to Point*, *Calculate Geometry* a *Point to Raster*.

## 7. VÝSLEDKY

### 7.1. Základní charakteristika dendrochronologických dat

Souhrn základních čísel popisujících vytvořená dendrochronologická data (letokruhové série) ze všech zkoumaných lokalit je uveden níže v tabulce 2.

**Tabulka 2:** Přehled základních údajů o letokruhových sériích na úrovni lokalit.

Lokalita	Počet vývrtů	Časové rozpětí	Průměrná			Průměrné DBH [cm]
			Délka série [roky]	Šířka letokruhu [mm]	Produktivita [mm]	
PLU	41	1882–2018	119	1,41	1,29	44,8
RAB	49	1751–2018	165	0,98	0,98	43,9
SUBRE	42	1872–2018	136	1,18	1,19	37,7
PRA	47	1804–2019	185	0,84	0,98	39,8
ZBE	30	1874–2019	131	1,39	1,39	neznámé
DIK	34	1768–2019	124	1,17	1,14	40,5
PRAVBR_K	30	1852–2013	134	1,13	1,21	neznámé
PRAVBR	44	1851–2013	153	0,85	0,91	neznámé
VILSTEN_K	29	1806–2013	150	1,15	1,21	neznámé
VILSTEN	43	1816–2014	138	0,99	0,99	neznámé
RUZZAHR	51	1772–2013	150	0,91	0,91	neznámé
RUZ	46	1713–2018	125	0,75	0,72	25,5
RUZZAHR_K	27	1854–2013	147	1,17	1,16	neznámé
PODVLH	20	1895–2011	112	1,55	1,29	neznámé
TISKAM	16	1857–2011	146	0,86	0,81	neznámé
MALAVLH	18	1814–2010	139	0,80	0,67	neznámé
KOS_S	62	1785–2017	117	0,81	0,59	22,5
KOS	110	1779–2018	149	0,58	0,41	21,5
SUPHOR	19	1838–2011	163	0,80	0,87	neznámé
SUPHOR_K	18	1868–2011	139	1,29	1,28	neznámé
VYSVRCH	17	1842–2010	152	0,87	0,88	neznámé
ADR	20	1770–2019	146	1,16	1,20	neznámé
SUC	35	1670–2018	271	0,65	0,65	39,7
VFTMA	39	1745–2018	245	0,66	0,74	neznámé
LUB	44	1766–2019	165	0,91	1,01	37,7
TRIKP	52	1696–2019	211	0,58	0,66	25,3
LET	59	1840–2019	146	0,99	1,07	36,9

Minimální počet vývrtů na jedné lokalitě je 16 (*TISKAM*), přičemž průměr je mnohem vyšší, a to již zmíněných 39. Nejdelší chronologií je *SUC*, jejíž časové rozpětí je 348 let, přičemž průměrná délka série nabývá 271 roků. K chronologiím, jejichž série jsou

v průměru delší než 200 let dále patří slovenské *VFTMA* a *TRIKP*. Naopak průměrně nejkratšími chronologiemi (průměrná délka série do 120 let) jsou *PODVLH* a *PLU*. Tímto ukazatelem k nim patří i *KOS\_S*, ale zde je údaj zkreslen tím, že se na lokalitě odebíraly všechny stromy. Mezi lokality s nejnižší průměrnou šířkou letokruhu patří *KOS*, *TRIKP*, *SUC* a *VFTMA* (vše do 0,7 mm). Jelikož jde o popis hrubých (nedetrendovaných dat), je potřeba brát v potaz, že je tento ukazatel je do jisté míry ovlivněn průměrnou délkou sérií (Pearsonův korelační koeficient mezi průměrnou délkou série a šířkou letokruhu činí -0,6). Lokality s více jak dvojnásobnou průměrnou šířkou letokruhu oproti nejužším (1,4 a víc) jsou *PODVLH*, *PLU* a *ZBE*. S průměrnou šířkou letokruhu velmi významně koreluje (Pearsonův korelační koeficient se rovná 0,93) průměrná produktivita. K výše zmíněným lokalitám s nejužšími letokruhy se dle produktivity řadí také *KOS\_S* a *MALAVLH*, zatímco k lokalitám s nejširšími letokruhy patří ještě *SUPHOR\_K* a *VILSTEN\_K*. Z principu svého výpočtu (viz kapitla 6.3.4.) by produktivitu neměla ovlivňovat průměrná délka série, resp. věkový trend. Z výsledků nicméně vyplývá, že mezi těmito proměnnými vztah existuje (Pearsonův korelační koeficient nabývá -0,43). Tuto skutečnost lze interpretovat tak, že v průměru panovaly ve zkoumaném území od zhruba konce 19. století (lokality s nejkratšími sériemi) příznivější podmínky pro radiální přírůst PISY než v období předchozím (~ přelom 18. a 19. století).

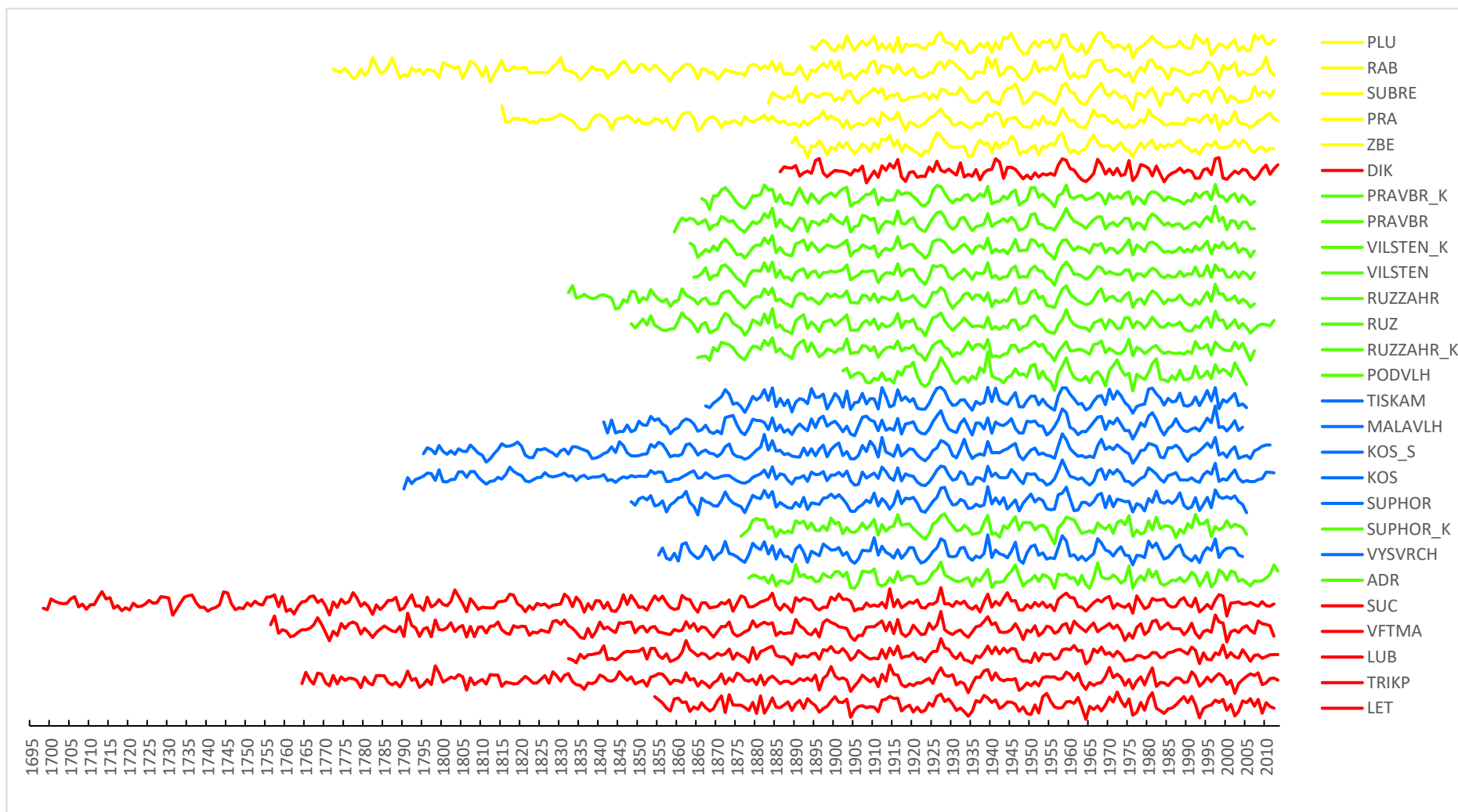
## 7.2. Chronologie Cropperových hodnot

Jednotlivé chronologie mediánu C values (obrázek 13 níže) se plošně shodují v některých letech, které byly později označeny jako PYs (viz kapitola 7.6.). Takovými roky jsou například 1956, 1964 či 1976. Chronologie však vizuálně vykazují vysokou míru shody i v některých opačných výkyvech, jako třeba v letech 1927, 1939 nebo 1959.

Délka jednotlivých chronologií se velmi různí – nejkratší *PODVLH* je dlouhá 104 let, zatímco nejdelší *SUC* dosahuje délky 315 let, viz tabulka 3 níže. Průměrná délka chronologie je pak 170 roků. Z pohledu četnosti výskytu C values spadajících do nejnižších 10 % hodnot v celém souboru (podmínka pro zahrnutí daného roku do regresní analýzy), se absolutně nejvíce těchto negativních C values vyskytuje na lokalitě *RAB*. Relativně nejčastěji (jednou za méně než 7 let) jsou pak tyto hodnoty zaznamenány na lokalitách *PODVLH* a *TISKAM*, což jsou lokality s relativně krátkými chronologiemi. Naopak nejméně často se takto nízké hodnoty mediánů C values vyskytují na lokalitě *VILSTEN* (jednou za 16 let) a velmi kontrastně vůči geograficky blízkým *PODVLH* a *TISKAM* také na *KOS* (jednou za 15 let).



**Obrázek 13:** Chronologie mediánu C values zkoumaných lokalit. Barva jednotlivých lokalit odpovídá jejich příslušnosti ke klastrům (viz obrázky 15 a 16).



**Tabulka 3:** Vybrané souhrnné údaje jednotlivých chronologií C values.

		10 % nejnižších C values (< -0,82)	
Lokalita	Délka chronologie [roky]	Počet	Frekvence výskytu (1x za X let)
PLU	119	11	10,8
RAB	241	27	8,9
SUBRE	130	14	9,3
PRA	199	16	12,4
ZBE	124	12	10,3
DIK	128	14	9,1
PRAVBR_K	142	16	8,9
PRAVBR	149	18	8,3
VILSTEN_K	145	12	12,1
VILSTEN	144	9	16,0
RUZZAHR	176	14	12,6
RUZ	165	15	11,0
RUZZAHR_K	143	15	9,5
PODVLH	104	15	6,9
TISKAM	139	20	7,0
MALAVLH	164	22	7,5
KOS_S	217	19	11,4
KOS	223	15	14,9
SUPHOR	158	21	7,5
SUPHOR_K	130	15	8,7
VYSVRCH	150	19	7,9
ADR	136	15	9,1
SUC	315	25	12,6
VFTMA	257	26	9,9
LUB	182	13	14,0
TRIKP	250	18	13,9
LET	159	18	8,8

## 7.3. Dendroklimatická analýza

### 7.3.1. Korelace Cropperových hodnot s klimatem

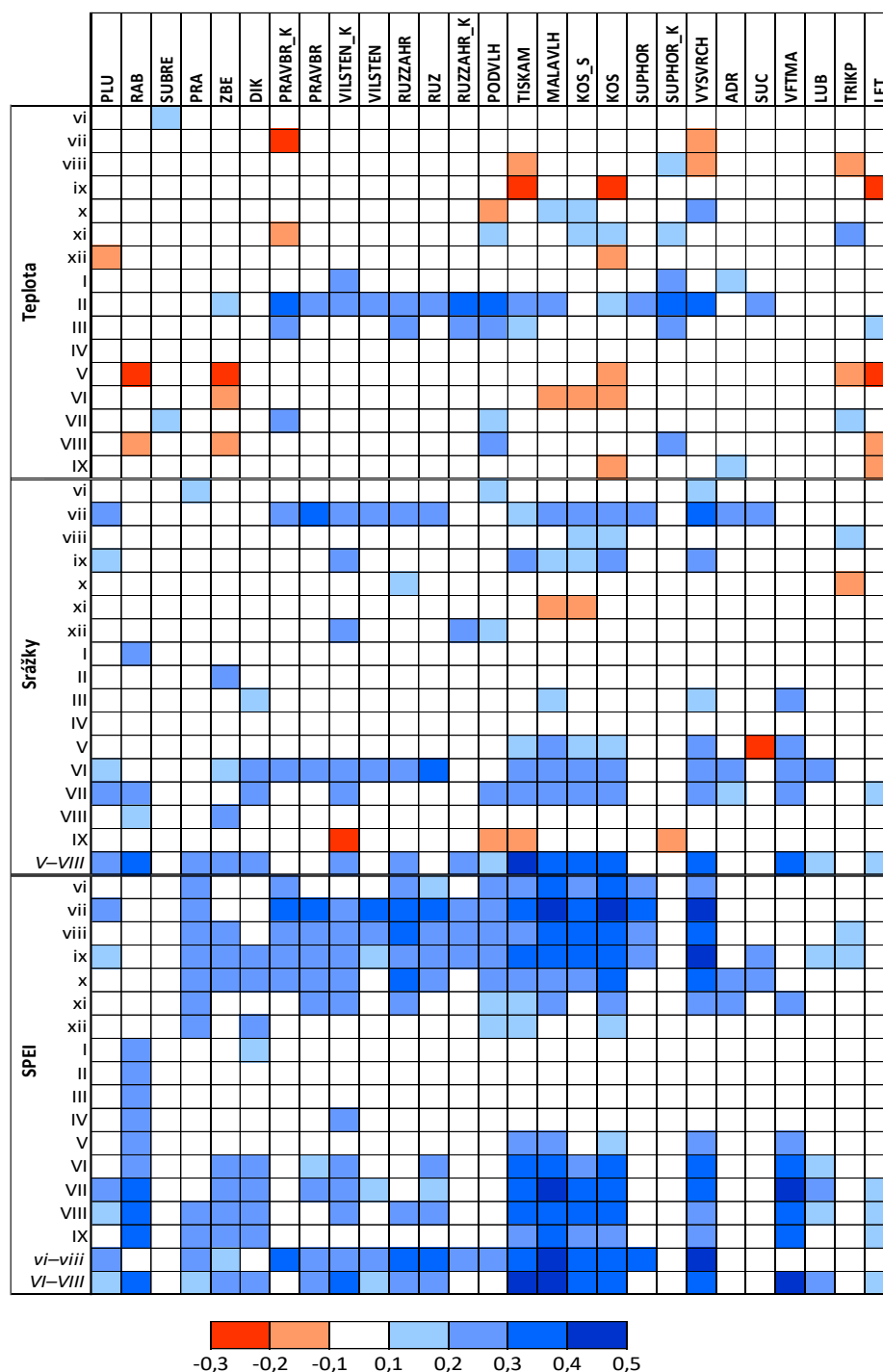
Závislost C values je nejčastější na SPEI, a sice vždy pozitivní (viz obrázek 14). Nejvyšší hodnoty i nejčastější výskyt těchto vztahů se projevují na lokalitách náchylných k nedostatku vody, zejména ve vegetační sezoně (např. *RAB* či skalní lokality jako *TISKAM*, *MALAVLH*, *KOS\_S*, *KOS* či *SUPHOR*). Významně se SPEI, avšak jen v daném roce, koreluje C values (kontrastně k přechozím lokalitám) na nejvýše položené, a hlavně jedné z nejvlhčích lokalit, *VFTMA*. Nejčastěji se signifikantní závislost C values

na SPEI pak vyskytuje v září předcházejícího roku, kdy koeficient na celkem 21 lokalitách nabývá hodnot od 0,16 do 0,41 (*VYSVRCH*). Nejtěsnější závislost (nejvyšší průměrné hodnoty) ve vztahu obou zmíněných proměnných je pozorována v červenci předchozího roku (0,34). Atypickou lokalitou je *RAB*, která jako jediná pozitivně koreluje ve všech měsících daného roku. Na dvou lokalitách (*SUBRE*, *SUPHOR\_K*), pak nebyl nalezen vztah mezi C values a SPEI v žádném zkoumaném měsíci.

Růst stromů prostřednictvím C values reagoval na srážky nejvíce v letních měsících, a to zejména v červenci předchozího a červnu a červenci daného roku. Nejvyšší hodnoty korelačních koeficientů v případě srážek dosahovaly právě v červenci předchozího roku (0,37 na *PRAVBR*, 0,35 na *VYSVRCH*). Na druhé straně se objevily dva měsíce vykazující pouze negativní závislost srážek na C values. Jde o přechodí listopad (pouze *MALAVLH* a *KOS\_S* s koeficienty do -0,2) a hlavně o září daného roku (nejsilnější vztah na *VILSTEN\_K* (-0,24), dále pak na *PODVLH*, *TISKAM* a *SUPHOR\_K*).

Nejvyšší variabilita reakcí růstu na jednu z klimatických proměnných je v případě teplot. V podstatě jediný konzistentní vztah je pozitivní závislost C values na zimních teplotách, a to hlavně v únoru (zaznamenán na 16 lokalitách). Negativní závislost se naopak vyskytuje hlavně v předchozím srpnu a září a současném květnu a červnu.

**Obrázek 14:** Pearsonovy korelační koeficienty mezi chronologiemi C values a klimatickými proměnnými (teplotou, srážkami a SPEI) v období 1901–2019\*. Zobrazeny jsou pouze ty hodnoty Pearsonových korelačních koeficientů, které jsou významné na hladině  $p < 0,05$ . Římsky psaná čísla měsíců jsou u předcházejících roků psány malými písmeny, zatímco měsíce daných let jsou značeny VELKÝMI PÍSMENY. Agregovaná klimatická data (tj. delší než jeden měsíc) jsou odlišeny *kurzívou*.



\* V případě slovenských lokalit v období 1901–2013. SPEI začíná vždy rokem 1902 (viz kap. 6.2.).

### 7.3.2. Chod klimatu v nejextrémnějších růstových letech

Odchytky klimatických dat třech nejextrémnějších roků od normálu jsou zobrazeny v příloze 2. Celkem bylo vytvořeno 12 „odchytkových klimadiagramů“ reprezentujících zkoumanou oblast (tj. jednu či více lokalit). Vzhledem k výsledkům korelací C values s klimatem (viz kapitola 7.3.1.), byla do odchytkových klimadiagramů zahrnuta klimatická data za celý dendrochronologický rok (tj. předchozí červen až září daného roku).

Hned v 6 z nich byl jedním z nejextrémnějších rok **1976** (dohromady se jedná o 13 lokalit: *PLU*, *RAB*, *SUBRE*, *ZBE*, *PODVLH*, *TISKAM*, *MALAVLH*, *KOS\_S*, *KOS*, *SUPHOR*, *SUPHOR\_K*, *VYSVRCH* a *SUC*). Tento rok se vyznačoval výrazně vyššími úhrny srážek v lednu, po něm však nastalo srážkově podprůměrné období s kulminací v létě (zejména v červu a srpnu). Abnormálně nízké teploty se vyskytly na začátku jara (hlavně v březnu), a to průměrně o 3 °C nižší než obvykle. Naopak o cca 3 °C bylo teplejší září předchozího roku.

Druhým nejčastějším extrémním rokem je **1956**, který je zaznamenán ve třech oblastech reprezentujících 16 lokalit (*PRAVBR\_K*, *PRAVBR*, *VILSTEN\_K*, *VILSTEN*, *RUZZAHR*, *RUZ*, *RUZZAHR\_K*, *PODVLH*, *TISKAM*, *MALAVLH*, *KOS\_S*, *KOS*, *SUPHOR*, *SUPHOR\_K*, *VYSVRCH* a *ADR*). Chod teplot v tomto roce byl extrémní v únoru, kdy vychází průměrné měsíční teploty až o 11,1 °C nižší (ve všech případech však alespoň o 10 °C) než je běžné. Podprůměrné teploty o několik jednotek stupňů však přetrvávaly téměř do konce vegetační sezony (alespoň do srpna). Srážkově nebyl rok 1956 ničím výjimečný, společným rysem je pouze mírně podprůměrný leden a květen a mírně nadprůměrný duben (všechny odchylky do 50 mm). Dalšími společnými srážkově podprůměrnými měsíci byly říjen a listopad roku 1955 (kumulativní odchylka přes -40 mm). Na lokalitě *ADR* začalo toto období deficitu srážek už v září, kdy za celý podzim spadlo o 75 mm srážek méně než je průměr.

Rok **1964** patří mezi nejextrémnější ve třech oblastech, kam spadají *PLU*, *DIK*, *TRIKP* a *LET*. Počátečním faktorem zapříčiňující propad mohly být podprůměrné srážky v červenci roku 1963 (deficit ve všech oblastech přesahoval 40 mm). V rámci *PLU*, *TRIKP* a *LET* byl následně rok 1964 (přinejmenším do pozdního léta) taktéž srážkově podprůměrný s relativně nejmenšími úhrny od května do července. Zároveň v době největších srážkových deficitů panovala povětšinou nadprůměrná teplota, což může vést k závěru, že za výrazné propady v růstu mohlo nastalé sucho. Na lokalitě *DIK* v daném roce nebyly až na červenec (deficit 36 mm) zaznamenány srážkové deficity. Naopak v srpnu byly naměřeny vysoce nadprůměrné srážky (přes 80 mm/měsíc). Vliv na výskyt

prudkého propadu v růstu mohly mít dlouhotrvající podprůměrné teploty od prosince až do začátku jara, jejichž měsíční odchylka dosahovala až  $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (prosinec). Navíc jsou nízké prosincové teploty ve vysokém kontrastu s nadprůměrnými teplotami v listopadu. Vzájemný teplotní rozdíl odchylek od normálu těchto dvou měsíců přesahoval i  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Dalším významným rokem, který se negativně projevil extrémním růstem, je **1923**. Byl zaznamenán ve dvou oblastech (České Švýcarsko, Kokořínsko), které však dohromady reprezentují 15 lokalit (*PRAVBR\_K*, *PRAVBR*, *VILSTEN\_K*, *VILSTEN*, *RUZZAHR*, *RUZ*, *RUZZAHR\_K*, *PODVLH*, *TISKAM*, *MALAVLH*, *KOS\_S*, *KOS*, *SUPHOR*, *SUPHOR\_K* a *VYSVRCH*). V roce 1922 se vyskytla dlouhá teplotně podprůměrná a zároveň srážkově bohatá epizoda. Ta trvala od července do listopadu s kulminací podprůměrných teplot v říjnu (odchylka od normálu  $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  na Kokořínsku, resp.  $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  v oblasti Českého Švýcarska). Kumulativní srážkové odchylky v tomto období dosahovaly průměrně  $-140\text{ mm}$ ). V samotném roce 1923 byla vedle podprůměrných srážek ve vrcholném létě (deficit v období červenec–září činil  $70\text{ mm}$  v případě Kokořínska,  $100\text{ mm}$  v případě Českého Švýcarska), zaznamenána výrazně podprůměrná teplota v červnu. Odchylka na obou lokalitách činí shodných  $-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Extrémní negativní růst se ve dvou oblastech dále objevil v letech 1905 (*ADR*, *VFTMA*, *LUB*), 1934 (*ZBE*, *TRIKP*, *LET*), 1998 (*RAB*, *PRA*) a 2000 (*SUC*, *VFTMA*, *LUB*). Všechny ostatní roky zachycené v příloze 2 se vyskytly pouze v jedné z oblastí.

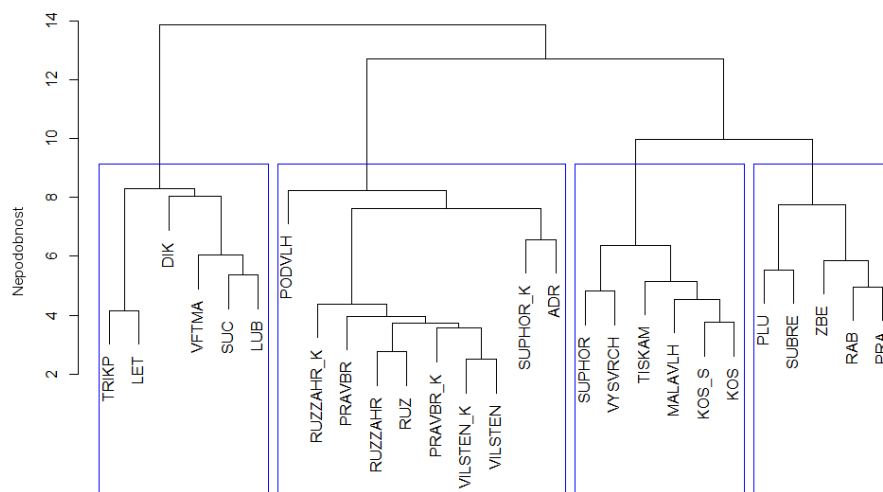
## 7.4. Klastrová analýza

Výsledky hierarchické klastrové analýzy mediánu C values všech lokalit v jejich vzájemně se překrývajícím období (1902–2004) jsou zobrazeny níže na obrázcích 15 (dendrogram) a 16 (mapa). Grafickým výstupem klastrové analýzy zkoumající geografické zákonitosti rozložení extrémních snížení růstu v 17 nejextrémnějších růstových letech je příloha 3, více viz kapitola 7.6.

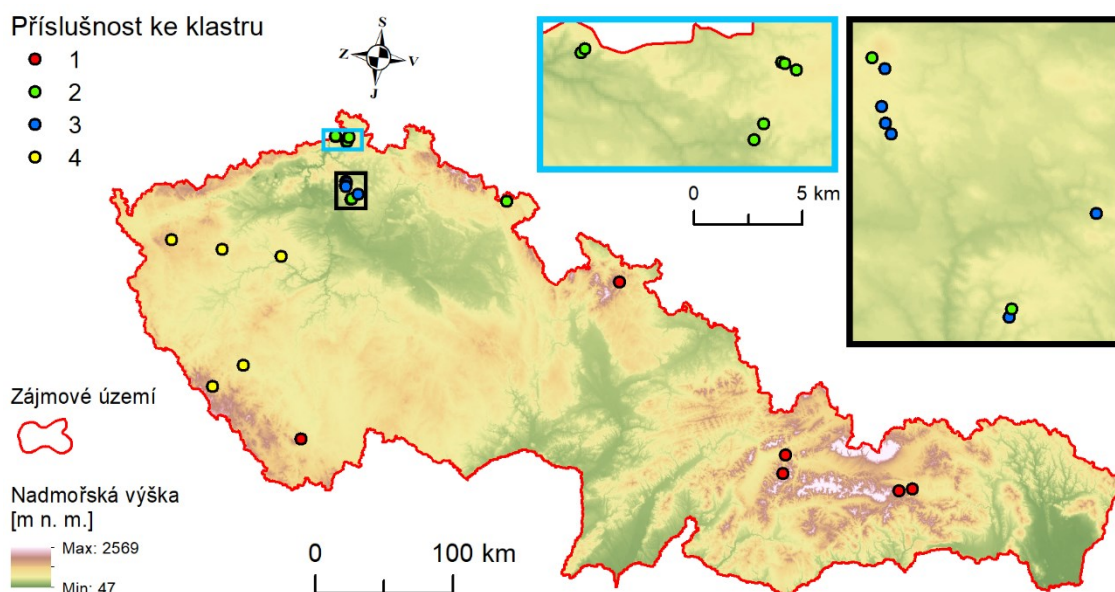
První z vyznačených klastrů obsahuje všechny slovenské (tedy nejvýchodnější) lokality. K tomuto shluku patří dále *SUC*, což je nejvýchodnější lokalita v Česku. Poslední lokalitou zařazenou do tohoto shluku je *DIK*, podle její výšky je však vidět, že je ze všech lokalit v tomto klastru nejvíce odlišná. Druhý vyznačený shluk je nejpočetnější (obsahuje 10 lokalit). Jeho báze je tvořena všemi lokalitami z oblasti Českého Švýcarska, což značí jejich vysokou vzájemnou homogenitu ve vztahu k růstu. Tyto lokality doplňují *ADR* a kokořínské *PODVLH* a *SUPHOR\_K*. Všechny zbývající lokality z Kokořínska shluknuté do dalšího klastru. Nejméně početným, avšak relativně heterogenním je poslední klaster.

Vnitřní různorodost (velká výška, resp. vzdálenost mezi lokalitami) odpovídá reálným geografickým vzdálenostem mezi danými lokalitami. Konkrétně sem spadají *PLU*, *SUBRE*, *ZBE*, *RAB* a *PRA*, jde tedy o všechny zbylé lokality ze Z a JZ zkoumaného území.

**Obrázek 15:** Dendrogram vzniklý hierarchickou klastrovou analýzou mediánů C values zkoumaných lokalit v období 1902–2004. Pro lepší přehled byly v dendrogramu modrou barvou vyznačeny jednotlivé shluky při jejich rozdělení do čtyř tříd.



**Obrázek 16:** Mapa zájmového území s lokalitami rozdělenými dle příslušnosti k jednotlivým klastrům. Čísla jednotlivých klastrů v mapě (obrázek 15 níže) odpovídají pořadí vyznačených klastrů (zleva doprava) v dendrogramu (obrázek 16 výše). Podle příslušnosti k jednotlivým klastrům byly barevně odlišeny chronologie C values v obrázku 13.



## 7.5. Faktory vysvětlující prostorové rozšíření extrémních roků

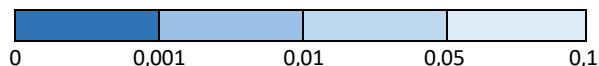
Hlavní výstupy regrese všech 98 analyzovaných let jsou zobrazeny v tabulce 4 níže.

Závislost propadů růstu se na základě regresorů (geografická poloha, nadmořská výška a produktivita prostředí) nepodařilo vysvětlit v mnohých letech. Hned u 35 let (více jak třetina zkoumaných roků) byl  $\text{Adj. } R^2 \leq 0,2$ , kdy byla zároveň hodnota  $p > 0,05$ . Z nejextrémnějších let, které byly klastrovány sem patří roky 1865, 1889, 1905, 1935, a 1976. Naopak roků, které po vypočtení plného modelu splňovaly podmínky pro zařazení k prostorové regresi ( $\text{Adj. } R^2 \geq 0,4$ ,  $p \leq 0,001$ ), bylo pouze 12: 1877, 1896, 1904, 1912, 1918, 1923, 1940, 1950, 1954, 1962, 1991 a 2002. Po provedení krokové regrese, kdy některé nevýznamné vysvětlující proměnné vypadly z modelu, daná kritéria pro prostorovou interpolaci naplňovalo 25 let. Vzhledem k absenci prostorových dat analogických k produktivitě, byly pro vybraných 25 let následně vypočteny lineární modely bez těchto regresorů. Z tohoto důvodu se u některých roků zvětšila ta část variability, kterou se nepodařilo vysvětlit. U tří let (konkrétně 1871, 1912 a 1993) hrála produktivita tak velký význam, že po jejím vyjmutí z modelu výsledné hodnoty  $p$  a/nebo  $\text{Adj. } R^2$  nesplňovaly kritéria pro zahrnutí do prostorové interpolace. Nakonec tak zůstalo 22 roků, které byly regresně interpolovány (viz příloha 4) a jejich popisu se věnuje kapitola 7.6.



**Tabulka 4:** Výsledky lineárního regresního modelu pro extrémní roky v období 1841–2012. Tučně jsou označeny ty roky, které byly prostorově interpolovány (viz příloha 4).

Hladina významnosti reg. koeficientů regresorů:



Rok	Počet lokalit	Absolutní člen	Regresní koeficienty nezávislých proměnných (regresorů)				Koeficient determinace (korigovaný)	Hodnota p
			Severnost	Východnost	Nadmořská výška	Produktivita		
1842	10	-7,64	0,1407	-0,0483	0,0015	0,0020	-0,30	0,7499
1843	10	-22,42	0,4159	0,1486	-0,0012	-0,0034	-0,11	0,5858
1844	10	46,42	-0,8751	-0,1439	-0,0003	-0,0102	0,49	0,1185
1845	10	55,76	-1,0335	-0,1922	0,0005	-0,0175	0,02	0,4634
1852	12	-0,67	0,0288	-0,0483	-0,0006	0,0005	0,47	0,0756
1857	14	13,00	-0,2548	-0,0259	0,0002	-0,0039	-0,25	0,8318
1858	14	-1,25	0,0072	0,0340	0,0000	-0,0051	-0,11	0,6270
1859	15	-4,32	0,0374	0,1716	-0,0011	-0,0013	0,13	0,2671
1860	15	4,63	-0,1146	0,0729	-0,0011	0,0046	0,26	0,5053
1865	18	-8,05	0,1233	0,1248	-0,0006	-0,0062	0,03	0,3837
1866	19	-3,42	0,0479	0,0786	-0,0001	-0,0037	0,00	0,4491
1867	20	3,57	-0,0431	-0,0541	0,0000	-0,0069	-0,03	0,5128
1868	20	37,05	-0,6748	-0,1674	-0,0006	-0,0095	0,37	0,0247
1869	20	12,25	-0,2370	-0,0881	-0,0002	0,0084	0,23	0,0947
1870	20	1,31	-0,0667	0,1238	-0,0009	0,0031	0,31	0,0484
1871	20	-48,00	0,8473	0,2986	0,0000	0,0111	0,56	0,0020
1872	20	-31,61	0,6395	-0,0253	0,0002	0,0031	0,54	0,0030
1874	20	-1,71	0,0392	0,0117	-0,0010	-0,0010	0,00	0,4323
1875	20	7,70	-0,1684	0,0664	-0,0004	-0,0048	0,17	0,1483
1876	21	1,96	-0,0716	0,0596	0,0009	-0,0037	0,44	0,0083
1877	21	32,81	-0,6465	-0,1309	0,0016	0,0007	0,59	0,0009
1878	22	16,38	-0,2979	-0,1939	0,0015	0,0049	0,47	0,0041
1880	22	-1,14	0,0683	-0,1979	0,0011	0,0039	0,52	0,0021
1882	22	-11,10	0,2880	-0,1590	0,0001	-0,0025	0,46	0,0050
1883	23	-14,48	0,2582	0,1170	-0,0004	0,0000	0,02	0,3905
1885	23	15,91	-0,3014	-0,0516	-0,0001	-0,0044	0,17	0,1152
1887	24	5,07	-0,1200	0,0274	-0,0001	0,0017	-0,07	0,6569
1888	24	8,32	-0,1947	0,0584	-0,0005	0,0038	0,12	0,1793
1889	25	22,36	-0,4257	-0,0946	-0,0004	-0,0015	0,15	0,1280
1892	25	-31,09	0,5937	0,0731	0,0003	0,0022	0,40	0,0057
1893	25	-4,14	0,0295	0,0989	0,0008	0,0034	0,24	0,0513
1896	25	42,53	-0,7492	-0,2519	-0,0014	-0,0067	0,58	0,0001
1898	25	-10,90	0,1879	0,0519	0,0009	0,0020	-0,03	0,5116
1902	26	-22,25	0,3738	0,1925	0,0000	0,0053	0,26	0,0311
1904	26	1,45	-0,0167	-0,1666	0,0016	0,0034	0,49	0,0007
1905	26	6,60	-0,1514	0,0047	-0,0006	0,0054	0,11	0,1605
1906	26	4,24	-0,1141	0,0630	-0,0007	0,0048	0,19	0,0693
1908	26	-30,61	0,5851	0,0537	0,0010	-0,0012	0,32	0,0127
1909	26	-3,77	0,1083	-0,0898	0,0006	-0,0060	0,10	0,1885
1911	26	9,75	-0,1895	-0,0724	0,0010	-0,0030	0,32	0,0133
1912	26	40,49	-0,7250	-0,1147	-0,0011	-0,0147	0,50	0,0005
1914	26	11,55	-0,2767	0,1185	0,0007	0,0030	0,45	0,0015
1915	26	15,24	-0,3231	0,0770	-0,0011	0,0014	0,26	0,0293
1917	26	-10,03	0,1763	0,0380	-0,0004	0,0040	0,19	0,0666
1918	26	-33,21	0,6293	0,0729	-0,0002	0,0053	0,62	0,0000
1920	26	-19,83	0,3995	-0,0137	0,0003	-0,0004	0,23	0,0457
1921	26	-12,01	0,2068	0,0222	0,0012	0,0022	0,36	0,0074
1922	26	3,09	-0,0804	-0,0311	0,0010	0,0011	0,46	0,0012
1923	26	17,14	-0,3531	-0,0627	0,0010	0,0011	0,68	0,0000
1924	26	14,63	-0,3026	0,0074	0,0005	-0,0013	0,46	0,0013
1930	26	19,04	-0,3854	-0,0218	0,0000	0,0022	0,23	0,0422
1931	26	1,39	-0,0249	-0,0249	0,0006	0,0000	-0,02	0,5119
1934	26	-29,67	0,5759	-0,0130	0,0004	0,0026	0,33	0,0107

Rok	Počet lokalit	Absolutní člen	Regresní koeficienty nezávislých proměnných (regresorů)				Koeficient determinace (korigovaný)	Hodnota p
			Severnost	Východnost	Nadmořská výška	Produktivita		
1935	26	-10,03	0,1641	0,0402	0,0004	0,0023	-0,07	0,6778
1937	26	-13,07	0,2155	0,0959	-0,0001	0,0075	0,04	0,2990
<b>1940</b>	<b>26</b>	<b>33,24</b>	<b>-0,6441</b>	<b>0,0050</b>	<b>-0,0012</b>	<b>-0,0082</b>	<b>0,62</b>	<b>0,0000</b>
1942	26	30,47	-0,5715	-0,0366	-0,0014	-0,0089	0,35	0,0077
1943	26	-7,68	0,1396	0,0035	0,0008	0,0011	-0,10	0,8109
1944	26	12,87	-0,2457	-0,0831	0,0012	0,0006	0,28	0,0239
1947	26	1,48	-0,0405	-0,0604	0,0008	0,0050	0,13	0,1411
1948	26	-14,32	0,2358	0,0959	-0,0008	0,0077	0,31	0,0160
1949	26	-12,55	0,2508	0,0227	-0,0003	-0,0060	0,22	0,0480
<b>1950</b>	<b>26</b>	<b>-38,66</b>	<b>0,7753</b>	<b>-0,0125</b>	<b>-0,0002</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,72</b>	<b>0,0000</b>
<b>1952</b>	<b>26</b>	<b>-17,99</b>	<b>0,3636</b>	<b>-0,0580</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,39</b>	<b>0,0042</b>
<b>1954</b>	<b>26</b>	<b>2,93</b>	<b>-0,1338</b>	<b>0,1515</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0109</b>	<b>0,63</b>	<b>0,0000</b>
1955	26	14,94	-0,3297	0,0291	0,0005	0,0047	0,42	0,0025
1956	26	31,02	-0,6004	-0,0319	-0,0006	-0,0097	0,38	0,0049
1960	26	-10,71	0,1916	0,0822	0,0000	0,0000	-0,08	0,7048
1961	26	-0,46	-0,0252	0,0801	0,0006	0,0017	0,20	0,0629
<b>1962</b>	<b>26</b>	<b>-7,47</b>	<b>0,0695</b>	<b>0,2267</b>	<b>-0,0003</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,52</b>	<b>0,0003</b>
1963	26	-19,94	0,3420	0,1202	0,0003	0,0042	0,25	0,0340
1964	26	-15,42	0,2891	-0,0048	0,0000	0,0020	0,21	0,0548
1965	26	13,55	-0,2689	-0,0396	-0,0001	0,0013	-0,01	0,4567
1969	26	11,92	-0,2317	-0,0542	0,0012	-0,0028	0,39	0,0044
<b>1974</b>	<b>26</b>	<b>-22,80</b>	<b>0,4352</b>	<b>0,0307</b>	<b>-0,0004</b>	<b>0,0047</b>	<b>0,43</b>	<b>0,0022</b>
1976	26	-4,68	0,0547	0,0724	-0,0006	-0,0008	0,00	0,4185
1977	26	-20,43	0,3713	0,0262	0,0014	0,0046	0,23	0,0462
1978	26	15,22	-0,2968	-0,0171	0,0001	-0,0015	0,20	0,0589
1979	26	20,87	-0,3806	-0,1176	-0,0003	-0,0031	0,31	0,0143
1982	26	-15,27	0,3146	0,3146	0,0000	0,0015	0,05	0,2857
1983	26	-5,62	0,1119	-0,0106	0,0000	-0,0006	0,00	0,8147
1984	26	-9,52	0,1674	-0,0294	0,0016	0,0027	0,24	0,0386
1985	26	-3,55	0,0709	-0,0040	0,0003	-0,0032	-0,11	0,8224
1987	26	20,01	-0,3552	-0,0730	-0,0003	-0,0103	0,22	0,0519
1989	26	6,33	-0,1611	0,0870	-0,0002	0,0015	0,20	0,0614
1990	26	6,94	-0,1800	0,0850	-0,0005	0,0071	0,35	0,0085
<b>1991</b>	<b>26</b>	<b>10,38</b>	<b>-0,2668</b>	<b>0,1574</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,69</b>	<b>0,0000</b>
1992	26	-28,21	0,5055	0,0731	0,0012	0,0133	0,30	0,0174
1993	26	17,75	-0,3106	-0,0299	-0,0015	-0,0132	0,45	0,0017
1998	26	-13,55	0,2139	0,0775	0,0018	0,0083	0,21	0,0582
2000	26	-4,66	0,0817	0,0155	-0,0013	0,0063	0,34	0,0101
<b>2002</b>	<b>26</b>	<b>-7,19</b>	<b>0,2079</b>	<b>-0,1822</b>	<b>-0,0003</b>	<b>-0,0003</b>	<b>0,57</b>	<b>0,0001</b>
2003	26	-6,35	0,1030	0,0302	-0,0001	0,0034	-0,09	0,7693
2005	24	6,62	-0,1667	0,0939	-0,0002	0,0003	0,22	0,0584
<b>2006</b>	<b>20</b>	<b>9,89</b>	<b>-0,2392</b>	<b>0,0937</b>	<b>0,0003</b>	<b>-0,0015</b>	<b>0,51</b>	<b>0,0032</b>
2007	20	-5,14	0,0822	-0,0540	0,0020	0,0051	0,30	0,0456
<b>2009</b>	<b>14</b>	<b>4,93</b>	<b>-0,0520</b>	<b>-0,1880</b>	<b>0,0014</b>	<b>-0,0024</b>	<b>0,58</b>	<b>0,0109</b>
2012	13	-20,56	0,4037	-0,0162	0,0005	0,0059	-0,08	0,5755

## 7.6. Geografické rozložení extrémních propadů růstu

V této kapitole jsou synteticky zhodnoceny a interpretovány výsledky růstu v jednotlivých extrémních letech z pohledu klastrové (příloha 3) a regresní analýzy (tabulka 4 a příloha 4), místy doplněny o výsledky dendroklimatické analýzy (příloha 2). Všech 17 let podrobených klastrové analýze je označeno jako PYs. Pět z těchto let bylo zároveň uspokojivě vysvětleno regresním modelem, a to konkrétně roky 1877, 1904, 1922, 1923 a 2006.

Obsah shluků vytvořených pro rok **1865** jsou z pohledu geografických charakteristik lokalit (poloha, nadmořská výška, ...) velmi heterogenní. Zároveň se ani jedna ze všech 18 lokalit výrazně neliší od ostatních a celková výška (míra nepodobnosti) dendrogramu je relativně nízká, což v tomto roce indikuje celkovou homogenitu růstu. To potvrzují i výsledky regresní analýzy, kdy v daném roce Adj.  $R^2$  dosahuje pouze 0,03, velikost C values se tedy prostorově nepodařilo vysvětlit.

Charakter propadů v růstu je dle lineárního modelu v roce **1872** závislý na zeměpisné šířce. Konkrétně je zde modelován jeden z největších gradientů vlivu severnosti ve všech zkoumaných letech. Velikost C value stoupá o 1 s každým nárůstem z. š. o 1,5°. Modelovaný vztah je silný a vysvětluje 60 % celkové variability (Adj.  $R^2 = 0,60$ ,  $p = 0,00003$ ).

V roce **1877** je naopak větší celkový kontrast (míra nepodobnosti mezi klastry na úrovni dvou tříd je dvojnásobná oproti 1865). Velmi homogenně zde reagují lokality z Kokořínska společně s Českým Švýcarskem, kam vyjma *KOS* a *SUPHOR\_K* spadají všechny tamní lokality. Od nich jsou samostatně oddělené (a nejvíce vzdálené) všechny slovenské lokality, které se na vyšších úrovních shlukují se všemi zbylými lokalitami. Obecně se dle charakteru shluků zdá, že velikost propadu v růstu souvisí s geografickou polohou lokalit. Tomu nasvědčují i výsledky regresní interpolace, které modelují vliv všech vysvětlujících proměnných. Ve srovnání s jinými roky hraje největší roli nadmořská výška, tj. je zde zaznamenán největší výškový gradient. C value stoupá o 1 s každými 625 výškovými metry. Z důvodu takto silného gradientu jsou v tomto roce modelovány vůbec nejvyšší C values ze všech interpolovaných let, kdy dosahují na vrcholcích Vysokých Tater 2,49.

C values v roce **1880** vysvětluje zejména zeměpisná délka. Východnost dosahuje třetího největšího modelovaného gradientu, kdy hodnoty C values klesají o 1 s každým nárůstem v. d. o 5°. Dalším (avšak o dost méně významným) regresorem je nadmořská výška, jejíž nárůst mírně zvyšuje modelované C values. Celkově tyto dvě proměnné vysvětlují přes polovinu variability vypočítaných C values (Adj.  $R^2 = 0,53$ ,  $p = 0,0003$ ).

V roce **1882** byl modelovaný vliv východnosti na hodnoty C values ještě vyšší než v roce 1880. Konkrétně hodnoty C values klesají o 1 při nárůstu v. d. o 4,6°. Zeměpisná délka je pro tento rok jediným regresorem, který však vysvětluje polovinu variability (Adj.  $R^2 = 0,50$ ,  $p = 0,0001$ ).

Rok **1889** generuje na úrovni čtyř tříd podobný klastr (obsahově i velikostně) jako ten z roku 1865. K lokalitám z Kokořínska a Českého Švýcarska se však přidaly geograficky

odlišné *SUC* a *LUB*. *SUPHOR\_K* je opět ve shluku s odlišnými lokalitami, tentokrát zejména se zbytkem slovenských (*VFTMA*, *TRIKP*, *LET*) a *RAB* s *KOS\_S*. Nicméně dle výsledků regrese, ač s velkou nejistotou ( $p = 0,128$ ), mohla mít na růst do jisté míry vliv severnost.

K rokům, kdy byla vysvětlena relativně malá část variability C values, patří **1892** (Adj.  $R^2 = 0,44$ ,  $p = 0,0006$ ). Významným regresorem byla severnost, součástí modelu je také východnost. S nárůstem s. š. i v. d. hodnoty C values stoupají.

Obsah klastrů v roce **1893** je relativně heterogenní. Největší z nich zahrnuje vedle lokalit z Českého Švýcarska i *PRA*, *ADR* a slovenské *VFTMA* s *LUB*. Nejmenší klastr pak shluje *ZBE*, *RAB* a *VYSVRCH*, které obecně patří k místům s nejnižšími úhrny srážek. Geograficky charakter růstu v tomto roce nebyl vysvětlen ani lineárním modelem.

C values v roce **1896** dle výsledků lineárního modelu vysvětlují všechny vstupní interpolovatelné regresory. Pro každou proměnnou je modelován relativně silný gradient. V případě východnosti jde o vůbec největší modelovaný gradient mezi všemi roky. C value v tomto případě klesá o 1 s každým nárůstem v. d. o  $4,5^\circ$ . V tomto roce byly modelovány i absolutně nejnižší hodnoty C values, a to  $-3,22$  pro nejvyšší vrcholy Vysokých Tater (stejně místo, pro které byly modelovány i nejvyšší C values v roce 1877). Celkově tento model vysvětluje přes polovinu variability vysvětlovaných C values (Adj.  $R^2 = 0,54$ ,  $p = 0,0002$ ).

Vzhledem k tomu, že v roce **1904** bylo zaznamenáno např. na lokalitě *PRA* relativně suché vegetační období, mohl být v tomto létě řídícím faktorem růstových depresí nedostatek vody. To by odpovídalo i tomu, že se od ostatních lokalit celkem výrazně lišily *SUBRE* a *SUC*, které jsou nejvýše položené v Česku. Další z klastrů tvoří *RAB*, *DIK*, *PLU* a *ZBE*, které vyjma zmíněných *PRA* a *SUBRE* beze zbytku reprezentují jižní a západní Čechy, jedná se tedy o nejzápadnější zkoumané lokality. Vliv geografické polohy se v daném roce potvrdil i v regresní analýze, kdy ovlivňujícím faktorem byla východnost a právě nadmořská výška. Stejně jako v roce 1877 zde byl namodelován největší výškový gradient odpovídající nárůstu C values o 1 s každými 625 výškovými metry. S každými  $5,7^\circ$  v. d. naopak C values o 1 poklesly.

Shluky v roce **1905** jsou velice heterogenní a nic nenaznačuje, že by byl nízký růst řízen nějakým velkoplošným faktorem. Například i slovenské lokality, které se geograficky nejvíce liší od všech ostatních, jsou rovnoměrně rozloženy ve všech klastrech. Tuto úvahu potvrzuje i výsledek lineárního modelu.

V roce **1911** se od zbytku lokalit nejvíce lišily *SUBRE* a *VFTMA*, což jsou 3. a 1. nejvýše položené ze zkoumaných lokalit. Jiné geograficky vyhraněné shluky se v tomto roce nevyskytly. Roli nadmořské výšky (na hladině významnosti  $p < 0,05$ ) potvrzuje lineární model, který celkově vysvětluje necelou třetinu variability ( $\text{Adj. } R^2 = 0,32$ ). Tento faktor může nepřímo reprezentovat vodní stres v nižších polohách z důvodu deficitu srážek ve vegetačním období (kumulativní odchylka od normálu za červenec a srpen převyšuje -130 mm). Vedle nadmořské výšky mohl být růst v tomto roce částečně podmíněn i východností.

Téměř polovina variability C values v roce **1914** je vysvětlována zeměpisnou polohou ( $\text{Adj. } R^2 = 0,46$ ,  $p = 0,0002$ ). Rostoucí severnost C values snižuje, zatímco narůstající východnost C values snižuje. Možnou klimatickou příčinou propadů v růstu na SZ území mohla být kombinace dvou faktorů. Na Kokořínsku byla řídící proměnnou nejspíše dlouhotrvající podprůměrná teplota. S výjimkou února (pozitivní odchylka 1,5 °C) zde v tomto roce byly všechny měsíce chladnější než obvykle. Od května do září byla průměrná měsíční negativní odchylka dokonce -3,3 °C. Na druhou stranu v Českém Švýcarsku mohlo být danou příčinou sucho. Zatímco chod teplot zde byl relativně průměrný, kumulativní srážkový deficit oproti normálu činil od dubna do srpna 103,9 mm.

Výsledky lineárního modelu pro rok **1918**, stejně jako v předchozím popisovaném roce, vysvětlují velikost C values polohou lokalit. Významnější z obou regresorů je zde severnost, která nabývá i celkem vysokého gradientu (nárůst C values o 1 s každými 1,6° s. š.). Gradient i vliv východnosti je oproti šířkové složce marginální. Obě proměnné dohromady vysvětlují 58 % variability C values ( $\text{Adj. } R^2 = 0,58$ ,  $p = 0,00001$ ). V tomto roce se vyskytlo vůbec nejnižší C value na lokalitě *PRA* za celé studované období. Zde byl zaznamenán vodní deficit na jaře a v létě (celkem -57,9 mm oproti normálu od března do září, srážkově nejchudší jsou květen a červen). Teplotně se od normálu výrazněji lišil jen červen, a to negativně (odchylka = -1,8 °C).

Rok **1922** je stejně jako 1865 celkově homogenní, což značí celková nízká výška (malá nepodobnost) dendrogramu. Některé z vyznačených klastrů se však od ostatních liší svou nadmořskou výškou. *SUBRE*, *PRA*, *LUB*, *PLU*, *TRIKP*, *DIK* a *SUC* jsou všechny mezi 11 nejvýše položenými lokalitami a dohromady v tomto roce tvoří dva shluky ze čtyř indikovaných. Vliv nadmořské výšky se potvrdil i v regresním modelu, který vysvětluje téměř polovinu variability ( $\text{Adj. } R^2 = 0,46$ ). Výsledek modeluje nárůst C value o 1 na každých 1000 nastoupaných metrů. Ostatní regresory byly nevýznamné.

Vliv geografie se do jisté míry projevuje ve shlucích z roku **1923**, což opět potvrzuje i klastrová analýza, která svým lineárním modelem vysvětluje přes dvě třetiny celkové

variability (Adj.  $R^2 = 0,69$ ). Dva největší klastry jsou až na výjimky (*RAB*, *LUB*) tvořeny pouze lokalitami z oblasti Českého Švýcarska a Kokořínska, což koresponduje s vlivem geografické polohy. S nárůstem severnosti a východnosti C values klesají, zatímco s narůstající nadmořskou výškou stoupají.

Regresní model vysvětluje polovinu variability C values zaznamenaných v roce **1924** (Adj.  $R^2 = 0,50$ ,  $p = 0,0001$ ). Dominantním regresorem je severnost (s jejím nárůstem o  $3,3^\circ$  s. š. C values klesají o 1), minoritní vliv má také nadmořská výška (C values s jejím nárůstem nepatrně stoupají). Řídící klimatickou příčinou tohoto uspořádání C values je patrně chod teploty. Tento rok byl obecně teplotně podprůměrný s tím, že největší negativní odchylky byly naměřeny na Kokořínsku. Průměrná měsíční odchylka v období leden–srpen zde činí  $-3,6^\circ\text{C}$ . Největší rozdíl od normálu zde byl naměřen v únoru ( $-5,6^\circ\text{C}$ ), který je současně měsícem, jenž teplotně nejvíce pozitivně koreluje s C values. Další největší únorová teplotní odchylka byla naměřena na severně položené *ADR* ( $-3,9^\circ\text{C}$ ). Oproti tomu například na slovenských lokalitách (jižnější poloha), byly únorové teplotní anomálie o něco mírnější ( $-3,1^\circ\text{C}$ ).

Podobně je na tom rok **1934**, u kterého se dva shluky skládají zejména z lokalit Českého Švýcarska a částečně Kokořínska (jediný navíc je *ADR*). V jednom klastru jsou i dvě nejvýchodnější lokality *TRIKP* a *LET* (zde je k nim přiřazena i lokalita *ZBE*). Za zmínku stojí i relativně vysoká výška, resp. nepodobnost dendrogramu, která indikuje velkou odlišnost mezi vyznačenými třídami klastrů. Na základě lineárního modelu lze tvrdit, že C values jsou částečně ovlivněné zeměpisnou šířkou (se stoupající severností stoupají i hodnoty C values). Po provedení krokové regrese tento model vysvětluje 39 % celkové variability (Adj.  $R^2 = 0,39$ ) při  $p = 0,0003$ . Výsledky pro tento rok tedy jen těsně nesplnily kritéria pro zahrnutí do prostorové interpolace.

Následující rok **1935** je svým charakterem podobný roku 1865. Celkově se taktéž jedná o homogenní rok, kdy jsou zároveň vnitřní klastry velmi heterogenní a v jejich rozložení nejsou ani dle lineárního modelu pozorovány žádné geografické zákonitosti.

Prostorové uspořádání C values je v roce **1940** vysvětlováno stejnými regresory jako v předchozím popisovaném roce. Rozdílem je silnější gradient obou proměnných a dále to, že s narůstající nadmořskou výškou C values klesají. Celkově lineární model v tomto roce vysvětluje 46 % variability C values (Adj.  $R^2 = 0,46$ ,  $p = 0,0002$ ).

Vnitřní heterogenita panuje napříč klastry i v roce **1948**. Zde i některé lokality z jedné oblasti (např. *RUZZAHR* a *RUZZAHR\_K*) náleží ke zcela odlišným shlukům. Ovšem podle výsledků regresního modelu mají určitý vliv východnost a produktivita (při jejich

nárůstu stoupají i C values). Dohromady tento model postihuje necelou třetinu celkové variability (Adj.  $R^2 = 0,31$ ).

Rozložení C values v roce **1950** je vysvětlováno pouze jedním regresorem. Tím je severnost, která v tomto roce dosahuje nejvyššího gradientu ze všech interpolovaných let. C values totiž stoupají o 1 s každým nárůstem severnosti o  $1,2^\circ$  s. š. (tj. zhruba každých 135 km v meridiálním směru). Celkový rozsah modelovaných hodnot je od -1,6 do 0,8. Regresní model v tomto roce vysvětluje nejvíce celkové variability C values ze všech interpolovaných let (Adj.  $R^2 = 0,75$ ,  $p = 3,3 \times 10^{-9}$ ).

I v roce **1952** je vysvětlující proměnnou rozložení C values pouze severnost. Ta má však mnohem nižší gradient než v roce 1950, proto je zde celkový rozsah modelovaných C values nižší (-1–0). Koeficient determinace je ve srovnání s většinou jiných let relativně nízký (Adj.  $R^2 = 0,43$ ,  $p = 0,0001$ ).

Ještě nižší část variability C values vysvětluje model pro rok **1954** (Adj.  $R^2 = 0,40$ ,  $p = 0,0008$ ), jehož výsledky téměř nenaplnily kritéria pro samotnou interpolaci. Gradienty obou vstupních regresorů (severnost a východnost) jsou velmi nízké: C values klesají o 1 s přibývajícím severností o  $4^\circ$  s. š., zatímco stoupají o stejnou hodnotu s každými  $9,9^\circ$  v. d. navíc.

Příliš odlišný od předchozích popisovaných není ani rok **1956**. Zde k nejvíce synchronizovanému růstu dochází v oblasti Českého Švýcarska, ale ani příslušnost těchto lokalit ke klastrům není jednotná (od ostatních se odlišuje *PRAVBR*). Zbylé shluky jsou svým obsahem ještě více různorodé. Lineární model však po provedení krokové regrese vysvětluje 39 % celkové variability (Adj.  $R^2 = 0,39$ ,  $p = 0,001$ ) severností a produktivitou (s nárůstem těchto proměnných C values klesají).

V regresním modelu roku **1962** vysvětluje přes polovinu celkové variability (Adj.  $R^2 = 0,53$ ,  $p = 0,00001$ ) pouze jeden regresor, kterým je východnost. Nejnižší modelovanou hodnotou je -0,9, zatímco nejvyšší dosahuje 1. C values tedy stoupají o 1 s každým nárůstem v. d. o  $5,4^\circ$ .

Obdobně je na tom i rok **1964**. Po vytvoření čtyř shlukových tříd tvoří jednu z nich osamocená lokalita *LET*. Ostatní klastry jsou vnitřně heterogenní bez zjevných geografických souvislostí. To převážně potvrzuje i lineární model, jenž vysvětluje pouze pětinu variability C values v daném roce (Adj.  $R^2 = 0,21$ ,  $p = 0,05$ ). Na hladině významnosti  $p < 0,05$  je nicméně modelován nepatrný vliv severnosti (C value stoupne o 1 při každém nárůstu s. š. o  $3,5^\circ$ ).

Výsledky regresního modelu v roce **1974** patří z hlediska velikosti vysvětlované části variability C values k těm slabším ( $\text{Adj. } R^2 = 0,42$ ,  $p = 0,0002$ ). Jedinou vysvětlující proměnnou je severnost, kdy s jejím nárůstem rostou i C values, konkrétně o 1 s každými  $2,2^\circ$  s. š.

Nejextrémnější rok **1976** je celkově taktéž značně homogenní. Shluky mají malou nepodobnost a lokality v nich jsou seskupovány z různých oblastí. Tato situace by se dala interpretovat tak, že negativní klimatické působení v tomto roce bylo tak silné a prostorově rozsáhlé, že geografická poloha neměla na velikost růstových propadů velký vliv. Tento předpoklad potvrzuje i lineární model, jenž nedokázal vysvětlit žádnou variabilitu C values.

Regresní model pro rok **1991** vysvětluje přes dvě třetiny celkové variability C values – společně s rokem 1923 se jedná o druhý (po roce 1950) nejlepší výsledek ze všech interpolovaných let ( $\text{Adj. } R^2 = 0,69$ ,  $p = 3,4 \times 10^{-7}$ ). C values jsou zde vysvětlovány geografickou polohou. Rostou o 1 s přibývajícím východností o  $7,1^\circ$  v. d., s nárůstem severnosti o  $3,2^\circ$  s. š. naopak o 1 klesají.

Uspořádání shluků v roce **1993** působí taktéž relativně nahodile, nicméně alespoň slovenské lokality jsou sdruženy v jednom ze čtyř klastrů. Avšak výsledky regresní analýzy odhalují relativně významný vliv produktivity (s jejím nárůstem C values klesají). Spolu s ní vysvětlují téměř polovinu celkové variability ( $\text{Adj. } R^2 = 0,46$ ,  $p = 0,0006$ ) ještě nadmořská výška a severnost. Taktéž s jejich nárůstem C values klesají.

C values jsou v roce **2002** vysvětlovány stejnými regresory jako předchozí popisovaný rok. Geografická poloha v tomto případě vysvětluje přes tři pětiny celkové variability ( $\text{Adj. } R^2 = 0,61$ ,  $p = 0,000005$ ). Vliv severnosti i východnosti mají v tomto roce opačný směr než v roce 1991. Gradient se zvýšil v případě východnosti (pokles C values o 1 s každými  $5,3^\circ$  v. d.), u severnosti naopak klesl (nárůst C values o 1 s každými  $4^\circ$  s. š.).

Posledním zkoumaným rokem je rok **2006**, kam spadá už jen 21 lokalit (svou délkou sem nedosahuje většina chronologií z Kokořínska). V tomto roce jsou klastry evidentně geograficky podmíněné. Jeden z nich obsahuje dvě nejvýchodnější lokality (*TRIKP*, *LET*), druhý pak lokality výhradně z Českého Švýcarska (*RUZZAHR\_K*, *VILSTEN\_K*, *RUZZAHR* a *RUZ*). Skupina nejvýše položených lokalit (*VFTMA*, *SUC* a *SUBRE*) tvoří další shluk (společně se *ZBE*). Na základě charakteru těchto shluků by se dalo předpokládat, že na růstové propady v tomto roce měla vliv nejen poloha, ale i nadmořská výška. Regresní model však předpoklad vlivu výšky nepotvrdil. Konkrétně



vysvětluje přes polovinu veškeré variability (Adj.  $R^2 = 0,55$ ,  $p = 0,0003$ ) jen geografickou polohou (C values stoupají s rostoucí východností a klesající severností).

Posledním interpolovaným rokem je **2009**. Do modelu vstoupilo už jen 14 lokalit a vysvětlujícími proměnnými jsou východnost a nadmořská výška. Celkově tyto dva regresory vysvětlují téměř dvě třetiny celkové variability C values, což řadí tento model mezi jeden z nejlepších z hlediska velikosti korigovaného koeficientu determinace (Adj.  $R^2 = 0,64$ ,  $p = 0,0009$ ). Směr i velikost gradientu východnosti je velmi podobný tomu v roce 2002 (C values klesají o 1 s každými  $5,7^\circ$  v. d.). Relativně vysoký gradient je zaznamenán v případě nadmořské výšky. C values stoupají o 1 s každým jejím nárůstem o 714 výškových metrů.

Nejčastějším regresorem ve 25 lineárně dostatečně vysvětlených letech byla po provedení krokové regrese severnost (vysvětlovala velikost C values v 19 případech). Druhou nejčastější vysvětlující proměnnou byla druhá horizontální složka polohy, a sice východnost (vysvětlující v 17 letech). Následovala nadmořská výška (vysvětlující v 11 letech) a nejméně častým regresorem byla produktivita (vysvětlující v 9 letech). Severnost zároveň nabývala zdaleka největších hodnot regresních koeficientů (maximum 0,8233). Druhé nejvyšší absolutní hodnoty se pak objevují u koeficientů východnosti (maximum 0,2236).

## 8. DISKUSE

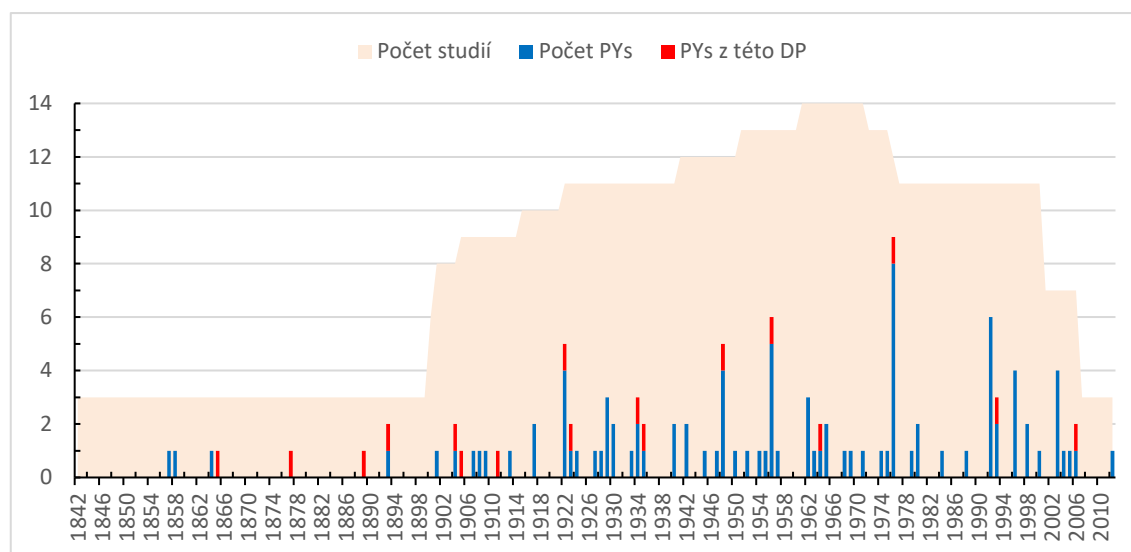
### 8.1. Chronologie Cropperových hodnot a identifikace pointer years

Délka jednotlivých chronologií patří k těm průměrným – hlavní zkoumané období (pokryté daty z nejméně 10 lokalit) je 1841–2012. Na straně jedné se práce zkoumající extrémní propady v růstu ve střední Evropě povětšinou věnovaly kratším časovým úsekům (např. [Neuwirth a kol. 2007](#), [Bijak 2008](#), [Schultz a kol. 2009](#)). Nicméně, ve srovnání s jinými (např. [Koprowski a kol. 2012](#), [Babst a kol. 2012](#)) je zkoumané období v této DP několikanásobně kratší. Průměrná byla délka zkoumaných chronologií C values i z pohledu studovaného druhu (PISY) v oblasti střední Evropy, viz [Maškova \(2017\)](#) rešerše.

Množstvím vstupních dat (celkem 23 lokalit v Česku a 4 na Slovensku) se patrně jedná o nejrozsáhlejší práci zkoumající extrémní propady růstu stromů (zde na příkladu PISY) v těchto zemích. Navíc se z prostoru Slovenska podařilo dohledat jen jednu práci, která se PYs částečně zabývá ([Balanda a kol. 2012](#)). Situace v Česku je lepší, této problematice se zde věnovalo hned několik prací (např. [Čejková, Kolář 2009](#), [Lehečková 2013](#), [Kolář a kol. 2017](#), [Vejpustková, Čihák 2019](#)).

Jelikož jsou C values svou povahou kontinuální data popisující relativní velikost změny růstu, počet identifikovaných PYs byl zvolen arbitrárně na 10 % nejnižších pozorovaných hodnot. V průměru tedy v této práci PY nastal jednou za 10 let. Relativní četnost výskytu PYs v pracích vstupujících do rešerše evidence extrémů ve střední Evropě (viz kap. 3.3.) se v tomto ohledu výrazně neliší. Průměrně se v těchto pracích identifikuje PY jednou za 14 let. Shoda PYs určených v této DP s předchozími studiemi je relativně vysoká (viz obrázek 17 níže). Extrémních roků, které se neshodují ani s jedním z PYs popsáných v literatuře, bylo z celkových 17 pouze 5. Tyto roky však všechny patří do první poloviny zkoumaného období, které není podloženo velkým množstvím zkoumaných prací. Těmito roky konkrétně jsou 1865, 1877, 1889, 1905 a 1911. Na druhou stranu, se 7 nejčastěji popisovanými PYs se shodují hned 4 PYs z této práce (1922, 1948, 1956 a 1976). Nejčastěji popisovaným PY v literatuře, který v této práci jako PY nebyl vyhodnocen, je rok 1992 (popsán byl např. v Polsku, Česku a Švýcarsku). Jeho vznik je u nás přisuzován působení sucha ([Čejková, Kolář 2009](#), [Kolář a kol. 2017](#)). Avšak dle použité metody vyšel tento rok v pořadí extremity v této DP až na 100. místě.

**Obrázek 17:** Vývoj počtu negativních PYs ve střední Evropě mezi roky 1841–2012 s vyznačenými PYs detekovanými v této DP.



**Zdroj:** Babst a kol. 2012, Bauwe a kol. 2013, Bijak 2008, Čejková, Kolář 2009, Kolář a kol. 2017, Koprowski a kol. 2012, Lehečková 2013, Lévesque 2013, Neuwirth a kol. 2004, Neuwirth a kol. 2007, Schultz a kol. 2009, Simon, Lena 2016, Vejpustková, Čihák 2019

## 8.2. Vysvětlení klimatických příčin negativních Cropperových hodnot

Téměř 90 % prací zkoumajících propady v růstu prostřednictvím PYs v posledních desetiletích (mezi 1998–2018) dává příčiny vzniku PYs do souvislostí s klimatickými příčinami (Jetschke a kol. 2019). Souvislost propadů s klimatem je taktéž jedním z východisek této práce – hlavní hypotézou je, že projevy extrémních let odpovídají klimatickým anomáliím a mohou tak být vysvětleny geograficky. Většina obdobných prací PYs interpretuje pomocí dendroklimatických korelací, kdy jsou klimatická data korelována se standardními či residuálními stanovištními chronologiemi (např. Simon, Lena 2016, Vejpustková, Čihák 2019), případně popíše klimatické podmínky v nejextrémnějších letech (Čejková, Kolář 2009). Chronologie některých ze zkoumaných lokalit už byly dokonce v dřívějších pracích s chodem klimatu korelovány (Lehečková 2013, Mašek 2019). Tato DP se v tomto ohledu liší pouze v tom, že namísto korelace chodu klimatu se standardními (či residuálními) chronologiemi, studovala vztah klima–růst za použití C values chronologií, podobně jako např. Elferts (2007) či Hordo a kol. (2009).

Výsledky samotné korelace (viz obrázek 14) ukazují silnou závislost C values na průběhu srážek a sucha (prostřednictvím SPEI) v letních měsících předcházejícího i daného roku zachycujícího propad v růstu. Z hlediska teplot pak C values nejvíce ovlivňuje jejich chod v únoru daného roku. Srovnání korelací klimatu se standardními chronologiemi [Lehečkové \(2013\)](#) a [Maška \(2019\)](#) ukázalo značně podobné výsledky, přesto lze nějaké rozdíly identifikovat. Korelace teplot s C values v této DP obecně zachycují více měsíců (jak v předešlém, tak daném roce), ve kterých byly vypočteny signifikantní závislosti daných veličin. Výsledky [Lehečkové \(2013\)](#) naopak ukazují častější korelaci se srážkami (a zároveň vyšší korelační koeficienty ve shodných letech). Bližší porovnání výsledků s [Maškem \(2019\)](#) odhalilo, že četnost měsíců s významnou závislostí C values se všemi analyzovanými klimatickými veličinami (teplota, srážky, SPEI), je v této DP mírně vyšší. Lze tak říci, že v tomto případě je síla závislosti mezi klimatem a chronologiemi C values nepatrně větší než mezi klimatem a standardními chronologiemi.

### **8.3. Určení geografických zákonitostí rozložení extrémních snížení růstu**

V diplomové práci bylo popsáno geografické rozložení extrémních propadů růstu ve 25, resp. 22 letech z celkem 98 extrémních roků zahrnutých do regresní analýzy (viz příloha 4). Geografická zákonitost rozložení C values se tedy podařila potvrdit a prostorově interpolovat téměř ve čtvrtině zkoumaných let. Tyto výsledky se dají porovnat s množstvím různých prací, které se věnovaly PYs ve střední Evropě (viz obrázek 6, resp. 17). Z daných autorů se prostorovým vysvětlováním PYs zabývali hlavně [Neuwirth a kol. \(2007\)](#) a [Babst a kol. \(2012\)](#).

Charakter růstu ve vybraných letech [Neuwirth a kol. \(2007\)](#) prostorově popisovali zejména z pohledu vertikální polohy. Konkrétně rok 1922 klasifikovali jako negativní ve všech výškových hladinách, zatímco dle výsledků DP byla nadmořská výška jediným regresorem, který velikost C values vysvětloval. Na druhou stranu v tomto roce byly C values modelovány relativně nízké i ve vysokých polohách (na nejvýše položené VFTMA vyšlo modelované C value na -0,37), což tím pádem de facto odpovídá výsledkům [Neuwirtha a kol. \(2007\)](#). Rok 1950 a 1962 autoři označují za smíšené s tím, že negativní PYs se vyskytují spíše v J části zkoumaného území a pozitivní hodnoty jsou pak od 50. rovnoběžky dále na sever. Toto uspořádání se shoduje s modelovanými výsledky v této DP pro rok 1950, avšak rozchází se s rokem 1962 (zde byl modelován pouze východní gradient). Posledním společně zkoumaným rokem byl 1954. Ten

[Neuwirth a kol. \(2007\)](#) klasifikují jako negativní pouze ve vyšších nadmořských výškách, zatímco modelované výsledky předkládané práce v tomto roce na nadmořské výšce nejsou závislé vůbec.

[Babst a kol. \(2012\)](#) prostorově zkoumali růstovou variabilitu v období 1500–2008. Při porovnávání jejich výsledků je potřebné si uvědomit, že pracovali na nižší měřítku (zkoumaným územím byla celá Evropa) a z oblasti zájmového území této DP neměli mnoho dat. Zato jižně, západně i východně od zájmového území měli lokality hustě zastoupené, jejich dostatečný výskyt byl ale i v Polsku (S od zájmového území DP). Interpolované roky v této DP, které se s jejich výsledky moc neshodují, mohli tedy být ovlivněny prostorově méně rozsáhlými faktory, které se v okolí zájmového území nemusely (dominantně nebo vůbec) projevovat. Mezi tyto roky patří 1872, 1880, 1922, 1924, 1940, 1954 a 1962. Žádná zjevná souvislost ve výsledcích neplatí ani pro interpolované roky ve 21. století, v tomto období však už [Babst a kol. \(2012\)](#) měli minimum (2002 a 2006), resp. žádná vstupní data (2009).

Částečná shoda výsledků [Babsta a kol. \(2012\)](#) s těmi v této práci byla objevena pro roky 1877 (shoda v negativním vlivu východnosti), 1892 (shoda v pozitivním vlivu východnosti), 1896 (shoda v negativním vlivu východnosti), 1904 (odvozená shoda v pozitivním vlivu nadmořské výšky z důvodu negativních reakcí k nízkým srážkám), 1914 (shoda v negativním vlivu severnosti), 1918 (shoda v pozitivním vlivu severnosti), 1923 (shoda v negativním vlivu severnosti), 1952 (shoda v pozitivním vlivu severnosti) a 1991 (shoda v negativním vlivu severnosti).

U let, ve kterých je pozorována vysoká míra shody výsledků [Babsta a kol. \(2012\)](#) a této DP, lze předpokládat velký prostorový rozsah (a souvislý gradient) působících faktorů na velikost C values, které by tak nejspíš mohly být extrapolovány za hranice zkoumaného území. Jedním z těchto roků je 1882, kde jsou na Z od Česka pozorovány pozitivní růstové odchylky a na V od Slovenska negativní růstové odchylky. Dalším rokem je 1950, ve kterém byla lineárním modelem v DP vysvětlena vůbec největší část variability C values ( $\text{Adj. } R^2 = 0,75$ ,  $p = 3,3 \times 10^{-9}$ ). V tomto roce [Babst a kol. \(2012\)](#) popisují výrazné negativní růstové reakce na srážky na J od zkoumaného území. Toto by tedy mohl být vysvětlující faktor výrazného pozitivního gradientu severnosti. Obdobným způsobem se shodují výsledky pro rok 1974, kdy [Babst a kol. \(2012\)](#) taktéž prezentují negativní růstové anomálie J od zájmového území a lineární model v tomto roce opět zachycuje pozitivní gradient severnosti (avšak téměř dvakrát menší než v roce 1950).

Pro podrobnější určení příčin vzniku PYs a souvisejících gradientů jednotlivých regresorů v interpolovaných letech by bylo vhodné analyzovat charakter a chod typů

povětrnostních situací sensu HMÚ (1968) cit. v ČHMÚ (2020b). Jelikož se čtvrtina zkoumaných let podařila vysvětlit regresním modelem, lze předpokládat, že právě chod meteorologických situací může (alespoň v některých letech) řídit propady růstu. To se totiž potvrdilo Schultzovi a kol. (2009) při zkoumání chodu a délky trvání jednotlivých typů povětrnostních situací na úrovni dní, resp. měsíců. Tento předpoklad podporuje skutečnost, že nejčastějšími a nejvýznamnějšími regresory byly severnost a východnost. Ty jsou projevem nehomogenního počasí v rámci meteorologických situací, které se neustále vyvíjí v čase i prostoru. Tím Schultz a kol. (2009) vysvětlují řídicí význam gradientu horizontální složky polohy, kdy nadmořská výška (resp. topografie) dané podmínky jen upravuje. Nejméně častým regresorem byla produktivita, což jen potvrzuje předpoklad určující role chodu klimatu na synoptické úrovni.

### 8.3.1. Nevysvětlené roky

Prostorové rozložení velikostí C values se nepodařilo vůbec vysvětlit ve více než třetině analyzovaných roků. Příčiny neprokázání žádných geografických zákonitostí u některých z nejextrémnějších let lze těžko odhalit. Například pro rok 1865 či 1889 nejsou k dispozici klimatická data a ani jeden z těchto let nebyl popsán v literatuře. Příčinou extrémních propadů v růstu v letech 1905 a 1935 mohou být vysoké deficity srážek napříč zájmovým územím. Konkrétně se vyskytly v létě 1904 (tedy přechozím roce) a v létě 1935. Pokud řídicím faktorem snížení růstu v roce 1905 byl nedostatek srážek v roce předchozím, nabízí se otázka, z jakého důvodu se právě rok 1904 geograficky podařilo vysvětlit. Na tyto výsledky může mít vliv mj. délka zvoleného okna či autokorelace (viz kapitola 8.4.). Vůbec nejextrémnější rok 1976 se nepodařilo vysvětlit patrně z podobného důvodu jako roky přechozí. Nízké únorové teploty a celkově srážkově chudý rok byly zaznamenány napříč celým zájmovým územím. Tento rok je dle literatury charakteristický velkým časovým i prostorovým rozsahem sucha (blíže viz kapitola 3.3.), které patrně eliminovalo jakýkoliv prostorový gradient v rozložení propadů růstu. Několik autorů navíc popisuje jako další možný faktor výskyt silných mrazů v květnu (Koprowski a kol. 2012, Vejpusťková, Čihák 2019).

## 8.4. Nejistoty spojené s použitou metodikou a interpretací výsledků

Metodika určování PYs se v této práci řídila doporučením nejaktuálnější studie (Jetschke a kol. 2019) zabývající se touto problematikou. Přes současné tendence eliminovat autorskou subjektivitu vstupující do výpočtů PYs, bylo stále potřebné arbitrárně nastavit

některá kritéria a parametry, které ze svého principu ovlivňují výsledky. Otázkou například je, zda při výpočtu C values za použití metody normalizace v plovoucím okně zvolit délku tohoto okna 13 let, jak bylo učiněno v této práci. [Jetschke a kol. \(2019\)](#) sice udávají řadu argumentů, proč zvolit toto (obecně spíše delší) okno (viz kapitola 3.2.1.), avšak dle výsledků této DP se nabízí možné bližší prozkoumání vlivu nastavení tohoto parametru. Ze 17 identifikovaných PYs totiž hned 7 let tvořily dva páry a jedna trojice let, které následovaly hned po sobě (1904–1905, 1922–1924 a 1934–1935). V letech 1922, 1923 i 1924 byly dokonce modelované C values významně ovlivněny ve shodném směru nadmořskou výškou a v případě 1923–1924 se projevil i souhlasný vliv severnosti – u obou regresorů v průběhu let přitom docházelo k poklesu jejich gradientu (viz příloha 4). Je tedy otázkou, zda klima řídilo růst stejným způsobem dva (či tři) roky po sobě pouze náhodou nebo jestli (a jak moc) je tento jev ovlivněn zvolenou délkou okna. Jako možné příčiny se ale nabízí i jiné faktory, například autokorelace obsažená v letokruzích a/nebo klimatických datech (viz kapitola 2.2.4). V příští obdobné práci by bylo příhodné zvážit, zda a případně jak by autokorelaci šlo eliminovat. Porozumění popisované problematiky by taktéž mohla pomoci analýza resilience a jejích komponent ([van der Maaten-Theunissen, van der Maaten 2016](#)).

Vedle 13letého okna pro výpočet C values mají na výsledky bezpochyby vliv i další parametry, které musely být zvoleny arbitrárně. Na druhou stranu, při posunutí těchto hranic či prahů by se výsledky pravděpodobně o tolik nelišily, protože by v principu nedošlo k žádné kvalitativní změně. Příklady těchto arbitrárně zvolených parametrů jsou minimální počet sérií pro určení mediánu C values (5), 10% hranice nejnižších mediánů C values pro označení roku jako extrémní či počet let s nejnižším mediánem C values pro označení roku jako PY (17 nejextrémnějších let).

Mezi dílčí nejistoty dále patří například zvolený způsob výpočtu produktivity. Jeho úskalí tkví v tom, že nebere ohled na klimatické trendy v řádu stovek let. Z toho vyplývá, že výsledná produktivita starších sérií (resp. chronologií) je vypočtena na základě růstu stromů, kdy v zájmovém území panovalo obecně chladnější a mírně vlhčí klima (např. [Dobrovolný a kol. 2009, Trnka a kol. 2011](#)).

Co se volby zájmového území týká, nejvíce limitujícím faktorem, vnášejícím určitou míru nejistoty do výsledků (zejména) regresní analýzy, je nerovnoměrné rozložení výzkumných lokalit ve zkoumaném prostoru. Doplnění alespoň několika studovaných porostů z oblasti Moravy by mohlo zkvalitnit výsledky lineárního modelu, avšak to bylo při zvoleném druhu (PISY) velmi obtížné.

Samotné výsledky regresních interpolací je třeba interpretovat s ohledem na geografické rozložení zkoumaných lokalit. Velká míra nejistoty velikosti modelovaných C values převládá vně lokality a stoupá s narůstající vzdáleností (např. V Slovensko). Stejná opatrnost je na místě v případě hodnocení velikostí C values modelovaných pro vysoké polohy (nejvýše položená zkoumaná lokalita je 1030 m n. m., zatímco nejvyšším bodem zkoumaného území je vrchol Gerlachovského štítu 2654 m n. m.). tato nejistota by se dala zmírnit tím, že by se ze zájmového území extrahovaly a vypustily polohy ležící nad výškovými maximy výskytu borovice lesní.

Prostorová konfigurace tak ovlivňuje i velikosti gradientů jednotlivých regresorů. Například v případě severnosti byla největší absolutní hodnota gradientu (0,8233) 3,7krát větší než v případě východnosti (0,2236). Lze předpokládat, že v případě srovnatelných vzdáleností mezi lokalitami v severním a východním směru, by i gradienty těchto horizontálních prostorových regresorů byly obdobné. Podle stejného principu je pak třeba brát ohled i na interpretaci velikosti gradientu nadmořské výšky.



## 9. ZÁVĚR

Pro 27 lokalit borovice lesní ležících v Česku (23) a na Slovensku (4) byly vytvořeny chronologie Cropperových hodnot, které v ročním kroku popisují relativní velikost propadu (či nárůstu) růstu. V rozmezí let 1841–2012 bylo určeno 17 negativních pointer years. Podle velikosti extrémního propadu růstu jsou souhrnně nejvíce extrémními roky 1976, 1956, 1877, 1923 a 1964.

Klimatické podmínky ovlivňující extrémní propad růstu byly spojené zejména se srážkami a suchem v létě roku předcházejícího i daného roku, kdy se vyskytl pointer year. Největší vliv teplot na propad růstu se projevil v únoru daného roku.

Dle rozložení propadů růstu v období, kdy se překrývala data ze všech lokalit (1902–2004), lze studované lokality geograficky rozdělit do následujících skupin: 1) jihovýchodní (všechny lokality na Slovensku, nejvýchodnější a nejjižnější lokality Česka); 2) západní (pět nejzápadnějších zkoumaných lokalit); 3) severní (lokality z Českého Švýcarska, Adršpachu a dvě z Kokořínska); 4) centrální (zbylé kokořínské lokality).

Nejvíce extrémní roky, které se podařilo zároveň uspokojivě vysvětlit regresním modelem, jsou 1877, 1904, 1922, 1923 a 2006. Vedle nich bylo rozložení Cropperových hodnot v dalších extrémních letech geograficky vysvětleno pomocí čtyř regresorů (severnost, východnost, nadmořská výška a produktivita) v celkem 25 letech. Z těchto let se podařilo 22 prostorově interpolovat (na základě regresního lineárního modelu bez produktivity) a vytvořit tak mapy klimatického signálu v extrémních letech. Celkově byly nejvýznamnějšími regresory severnost a východnost, menší vliv byl zaznamenán u nadmořské výšky a produktivity. To odpovídá předpokladu, že výskyt růstových propadů souvisí s chodem různých meteorologických situací (a jejich anomáliemi) na synoptickém měřítku.

## 10. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### 10.1. Literatura

AGRAWAL, A., CASHORE, B., HARDIN, R., SHEPHERD, G., BESON, C., MILLER, D. (2013): Economic Contributions of Forests. United Nations Forum on Forests, Tenth Session, Background Paper 1, Istanbul, 132 s.

ALBRECHT, J. (ed) a kol. (2005): Českobudějovicko, svazek VIII. In: Mackovčín, P., Sedláček, M. (eds): Chráněná území ČR. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 808 s.

BABST, F., CARRER, M., POULTER, B., URBINATI, C., NEUWIRTH, B., FRANK, D. (2012): 500 years of regional forest growth variability and links to climatic extreme events in Europe. Environmental Research Letters, 7, č. 4, 045705 (11 s.).

BALATKA, B., KALVODA, J. (2006): Geomorfologické členění reliéfu Čech. Kartografie PRAHA, a.s., Praha, 79 s.

BALANDA, M., BUGALA, M., LUKÁČIK, I. (2012): Produkčný potenciál jelše lepkavej (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.) v podmienkach Kremnických vrchov. Acta Pruhoniciana, č. 102, s. 25–29.

BAUWE, A., KOCH, M., KALLWEIT, R., KONOPATZKY, A., STROHBACH, B., LENNARTZ, B. (2013): Tree-ring growth response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to climate and soil water availability in the lowlands of North-Eastern Germany. Baltic Forestry, 19, č. 2, s. 212–225.

BIJAK, S. (2008): Various factors influencing the pointer year analysis. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, 6, s. 77–82.

BÍNA, J., DEMEK, J. (2012): Z nížin do hor: Geomorfologické jednotky České republiky. Academia, Praha, 344 s.

BIRKS, H. J. B., TINNER, W. (2016): Past forests of Europe. In: San-Miguel-Ayanz, J., De Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (eds): European atlas of forest tree species. Publications Office of the European Union, Luxembourg, s. 36–39.

BRADSHAW, R. H., JONES, C. S., EDWARDS, S. J., HANNON, G. E. (2015): Forest continuity and conservation value in Western Europe. Holocene, 25, č. 1, s. 194–202.

BRÄUNING, A. (1994): Dendrochronology for the last 1400 years in eastern Tibet. *GeoJournal*, 34, č. 1, s. 75–95.

BRÄUNING, A., DE RIDDER, M., ZAFIROV, N., GARCÍA-GONZÁLEZ, I., DIMITROV, D. P., GÄRTNER, H. (2016): Tree-ring features: indicators of extreme event impacts. *IAWA Journal*, 37, č. 2, s. 206–231.

BRIFFA, K. R., JONES, P. D., SCHWEINGRUBER, F. H., OSBORN, T. J. (1998): Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 393, č. 6684, s. 450–455.

BUNN, A. G. (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26, č. 2, s. 115–124.

CARLSON, C. A., BATES, N. R., HANSELL, D. A., STEINBERG, D. K. (2001): Carbon Cycle. In: Steele, J. H. (ed): *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Second edition. Elsevier, London, s. 477–486.

COOK, E. R., KARIUKSTIS, L. A. (1990): *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, International Institute for Applied Systems Analysis, Dordrecht, 351 s.

COPENHEAVER, C. A., POKORSKI, E. A., CURRIE, J. E., ABRAMS, M. D. (2006): Causation of false ring formation in *Pinus banksiana*: A comparison of age, canopy class, climate and growth rate. *Forest Ecology and Management*, 236, č. 2, s. 348–355.

COPINI, P. (2015): Markers inside wood: tree rings as archives of insect outbreaks, drift-sand dynamics, and spring flooding. *Disertační práce*. Wageningen University, Wageningen, 192 s.

CROPPER, J. P. (1979): Tree-Ring Skeleton Plotting by Computer. *Tree-Ring Bulletin*, 39, s. 47–59.

CULEK, M., GRULICH, V., LAŠTŮVKA, Z., DIVÍŠEK, J. (2013): Biogeografické regiony České republiky. Masarykova univerzita, Brno, 447 s.

ČEJKOVÁ, A., KOLÁŘ, T. (2009): Extreme Radial Growth Reaction of Norway Spruce Along An Altitudinal Gradient in the Šumava Mountains. *Geochronometria*, 33, č. 1, s. 41–47.

DE BAAR, H. J. W. (1994): von Liebig's law of the minimum and plankton ecology (1899–1991). *Progress in Oceanography*, 33, č. 4, s. 347–386.

DEMEK, J. (ed) a kol. (1987): Zeměpisný lexikon ČSR: Hory a nížiny. Academia, Praha, 584 s.

DE MICCO, V., CAMPELO, F., DE LUIS, M., BRÄUNING, A., GRABNER, M., BATTIPAGLIA, G., CHERUBINI, P. (2016): Intra-annual density fluctuations in tree rings: how, when, where, and why? *IAWA Journal*, 37, č. 2, s. 232–259.

DESCH, H. E., DINWOODIE, J. M. (1996): *Timber: Structure, Properties, Conversion and Use*. Seventh edition. Macmillan Press, London, 309 s.

DESPLANQUE, C., ROLLAND, C., SCHWEINGRUBER, F. H. (1999): Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation. *Trees*, 13, č. 4, s. 218–227.

DIMOUDI, A., NIKOLOPOULOU, M. (2003): Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35, č. 1, s. 69–76.

DOBROVOLNÝ, P., BRÁZDIL, R., VALÁŠEK, H., KOTYZA, O., MACKOVÁ, J., HALÍČKOVÁ, M. (2009): A standard paleoclimatological approach to temperature reconstruction in historical climatology: an example from the Czech Republic, A.D. 1718–2007. *International Journal of Climatology*, 29, č. 10, s. 1478–1492.

ELFERTS, D. (2007): Scots pine pointer-years in northwestern Latvia and their relationship with climatic factors. *Acta Universitatis Latviensis*, č. 723, s. 163–170.

ENGELMARK, O., KULLMAN, L., BERGERON, Y. (1994): Fire and age structure of Scots pine and Norway spruce in northern Sweden during the past 700 years. *New Phytologist*, 126, č. 1, s. 163–168.

FALTYSOVÁ, H., MACKOVČIN, P., SEDLÁČEK, M. (eds) a kol. (2002): Královéhradecko, svazek V. In: Mackovčín, P., Sedláček, M. (eds): *Chráněná území ČR*. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 410 s.

FAO (2016): *Global forest resources assessment 2015: how are the world's forests changing?* Second edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 44 s.

FAO (2018): *Terms and Definitions*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Global Forest Resources Assessment 2020, Forest Resources Assessment Working Paper 188*, Rome, 26 s.

FILION, L., PAYETTE, S., GAUTHIER, L., BOUTIN, Y. (1986): Light rings in subarctic conifers as a dendrochronological tool. *Quaternary Research*, 26, č. 2, s. 272–279.

FLETCHER, J. M. (1975): Relation of abnormal earlywood in oaks to dendrochronology and climatology. *Nature*, 254, č. 5500, s. 506–507.

FONTANA, C., SANTINI-JUNIOR, L., OLMEDO, G. M., BOTOSSO, P. C., TOMAZELLO-FILHO, M., OLIVEIRA, J. M. (2019): Assessment of the dendrochronological potential of *Licaria bahiana* Kurz, an endemic laurel of lowland Atlantic forests in Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, 33, č. 3, s. 454–464.

FRITTS, H. C. (1976): *Tree rings and climate*. Academic Press, London, 567 s.

GARDNER, T. A., BARLOW, J., CHAZDON, R., EWERS, R. M., HARVEY, C. A., PERES, C. A., SODHI, N. S. (2009): Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecology Letters*, 12, č. 6, s. 561–582.

GAUDEL, G., HUI, Z. W., HUNG, D. Q., HIËN, L. T. T. (2016): The Global Terrestrial Carbon Stocks, Status of Carbon in Forest and Shrub Land of Nepal, and Relationship between Carbon Stock and Diversity. *International Journal of Research*, 3, č. 1, s. 620–634.

GEORGE, S. S., AULT, T. R., TORBENSON, M. C. A. (2013): The rarity of absent growth rings in Northern Hemisphere forests outside the American Southwest. *Geophysical Research Letters*, 40, č. 14, s. 3727–3731.

GREGOR, A. (1965): Stručný přehled historie naší meteorologie. *Meteorologické zprávy = Meteorological Bulletin: časopis pro odbornou veřejnost*, 18, č. 2, s. 30–33.

GONZÁLEZ, I. G., ECKSTEIN, D. (2003): Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology*, 23, č. 7, s. 497–504.

HANTEMIROV, R. M., GORLANOVA, L. A., SHIYATOV, S. G. (2004): Extreme temperature events in summer in northwest Siberia since AD 742 inferred from tree rings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209, č. 1, s. 155–164.

HARRIS, I., JONES, P. D., OSBORN, T. J., LISTER, D. H. (2014): Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, č. 3, s. 623–642.

HEBÁK, P., HUSTOPECKÝ, J., JAROŠOVÁ, E., MALÁ, I. (2007): *Vícerozměrné statistické metody*. Druhé vydání. Informatorium, Praha, 239 s.

HMÚ (1968): *Katalog povětrnostních situací pro území ČSSR (kolektiv autorů)*. Hydrometeorologický ústav, Praha, 94 s.

HOADLEY, R. B. (1990): Identifying wood: accurate results with simple tools. Taunton Press, Newtown, 223 s.

HOGG, E. H., HART, M., LIEFFERS, V. J. (2002): White tree rings formed in trembling aspen saplings following experimental defoliation. Canadian Journal of Forest Research- Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 32, č. 11, s. 1929–1934.

HORDO, M., METSLAID, S., KIVISTE, A. (2009): Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth to climate factors in Estonia. Baltic Forestry, 15, č. 2, s. 195–205.

HOUSTON DURRANT, T., DE RIGO, D., CAUDULLO, G. (2016): *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., De Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (eds): European atlas of forest tree species. Publications Office of the European Union, Luxembourg, s. 132–133.

HUBER, B. (1943): Über die Sicherheit jahrringschronologischer Datierung. Holz als Roh-und Werkstoff, 6, č. 10–12, s. 263–268.

HUBER, B., GIERTZ-SIEBENLIST, V. (1969): Unsere tausendjährige Eichen-Jahrringchronologie. Durchschnittlich 57-(10-50-) fach belegt, Sitz. Ber. Österr. Akad. Wiss. Math.-nat. Kl., Abt. I, 778, s. 37–42.

CHERUBINI, P., SCHWEINGRUBER, F. H., FORSTER, T. (1997): Morphology and ecological significance of intra-annual radial cracks in living conifers. Trees, 11, č. 4, s. 216–222.

CHYTRÝ, M., KUČERA, T., KOČÍ, M., GRULICH, V., LUSTYK, P., ŠUMBEROVÁ, K., SÁDLO, J., NEUHÄUSLOVÁ, Z., HÁJEK, M., RYBNÍČEK, K. (2010): Katalog biotopů České republiky. Druhé vydání. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 445 s.

JACKSON, S. T. (2006): Vegetation, environment, and time: The origination and termination of ecosystems. Journal of Vegetation Science, 17, č. 5, s. 549–557.

JETSCHKE, G., VAN DER MAATEN, E., VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M. (2019): Towards the extremes: A critical analysis of pointer year detection methods. Dendrochronologia, 53, s. 55–62.

JOHNSON, O., MORE, D. (2006): Collins tree guide. Collins, London, 464 s.

KIRSCHBAUM, M. U. F. (1996): The carbon sequestration potential of tree plantations in Australia. In: Eldridge, K. G. (ed): Environmental management: the role of eucalypts

and other fast growing species, CSIRO Forestry and Forest Products, Canberra, s. 77–89.

KNUCHEL, H. (1947): Holzfehler. Werner Classen Verlag, Zürich, 119 s.

KOLÁŘ, T., ČERMÁK, P., TRNKA, M., ŽID, T., RYBNÍČEK, M. (2017): Temporal changes in the climate sensitivity of Norway spruce and European beech along an elevation gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, s. 24–33.

KOPROWSKI, M., PRZYBYLAK, R., ZIELSKI, A., POSPIESZYŃSKA, A. (2012): Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland. *International Journal of Biometeorology*, 56, č. 1, s. 1–10.

KRAKAU, U.-K., LIESEBACH, M., ARONEN, T., LELU-WALTER, M.-A., SCHNECK, V. (2013): Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). In: Pâques, L. E. (ed): *Forest Tree Breeding in Europe: Current State-of-the-Art and Perspectives*. Springer Netherlands, Dordrecht, s. 267–323.

KUČERA, M., ADOLT, R. (eds) a kol. (2019): *Národní inventarizace lesů v České republice – výsledky druhého cyklu 2011–2015. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem*, 439 s.

KYNCL, J. (2017): *Letokruhy jako kalendář i záznamník: Zajímavosti z dendrochronologie*. Grada Publishing, Praha, 144 s.

LAMARCHE, V. C., HIRSCHBOECK, K. K. (1984): Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature*, 307, č. 5947, s. 121–126.

LATHAM, J. a kol. (2014): *FAO Global Land Cover (GLC-SHARE) Beta-Release 1.0 Database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Land and Water Division, Rome, 39 s.

LEHEČKOVÁ, E. (2013): *Citlivost letokruhových řad borovice lesní (*Pinus sylvestris*) ke klimatickým parametrům*. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 107 s.

LÉVESQUE, M. (2013): *Drought response of five conifers along an ecological gradient in Central Europe: a multiproxy dendroecological analysis*. Doctoral thesis. ETH Zurich, Zurich, 133 s.

LIANG, E., ECKSTEIN, D. (2006): Light rings in Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) in semiarid areas of north China and their palaeo-climatological potential. *New Phytologist*, 171, č. 4, s. 783–791.

LOŽEK, V. (2007): Role pískovcových oblastí v české krajině. In: Bauer, P., Kopecký, V., Šmucar J. (eds): *Labské pískovce – historie, příroda a ochrana území*. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Správa CHKO Labské pískovce, Děčín, s. 9–13.

LOŽEK, V., KUBÍKOVÁ, J., ŠPRYŇAR, P. (eds) a kol. (2005): *Střední Čechy, svazek XIII*. In: Mackovčin, P., Sedláček, M. (eds): *Chráněná území ČR*. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 904 s.

MAŠEK, J. (2017): *Vytvoření a interpretace lokální letokruhové chronologie borovice lesní*. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 50 s.

MAŠEK, J. (2019): *Faktory ovlivňující růstové trendy a stabilitu klimatického signálu u středoevropských jehličnanů*. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 76 s.

MÁTYÁS, C., ACKZELL, L., SAMUEL, C. J. A. (2004): *EUFORGEN technical guidelines for genetic conservation and use for Scots pine (*Pinus sylvestris*)*. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, 6 s.

MAZÚR, E., LUKNIŠ, M. (1986): Geomorfologické členenie SSR a ČSSR. Časť Slovensko. *Geografický časopis*, 30, č. 2, s. 101–125.

METZGER, M. J., BUNCE, R. G. H., JONGMAN, R. H. G., MÜCHER, C. A., WATKINS, J. W. (2005): A climatic stratification of the environment of Europe: A climatic stratification of the European environment. *Global Ecology and Biogeography*, 14, č. 6, s. 549–563.

MIKLÓS, L. a kol. (2002): *Atlas krajiny Slovenskej republiky*. První vydání. Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, Bratislava, 344 s.

MURTAGH, F., LEGENDRE, P. (2014): Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward's Criterion? *Journal of Classification*, 31, č. 3, s. 274–295.

MYERS-SMITH, I. H. a kol. (2015): Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome. *Nature Climate Change*, 5, č. 9, s. 887–891.



NEUWIRTH, B., ESPER, J., SCHWEINGRUBER, F. H., WINIGER, M. (2004): Site ecological differences to the climatic forcing of spruce pointer years from the Lötschental, Switzerland. *Dendrochronologia*, 21, č. 2, s. 69–78.

NEUWIRTH, B., SCHWEINGRUBER, F. H., WINIGER, M. (2007): Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, 24, č. 2–3, s. 79–89.

NOVAK, K., DE LUIS, M., ČUFAR, K., RAVENTÓS, J. (2011): Frequency and variability of missing tree rings along the stems of *Pinus halepensis* and *Pinus pinea* from a semiarid site in SE Spain. *Journal of Arid Environments*, 75, č. 5, s. 494–498.

NOWAK, D. J., CRANE, D. E. (2000): The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions. In: Hansen, M., Burk, T. (eds): Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. General Technical Report NC-212, US Department of Agriculture Forest Service, North Central Forest Experiment Station, St. Paul, s. 714–720.

OWCZAREK, P., OPAŁA, M. (2016): Dendrochronology and extreme pointer years in the tree-ring record (AD 1951–2011) of polar willow from southwestern Spitsbergen (Svalbard, Norway). *Geochronometria*, 43, č. 1, s. 84–95.

PALMER, W. C. (1965): Meteorological drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, DC, 58 s.

PÍRO, L. (2011): Dynamika horní hranice lesa v závislosti na expozici svahu, západní Krkonoše. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 71 s.

POKORNÝ, P. (2011): Kronika českých pralesů: jak vypadaly a proč už s námi nejsou. *Vesmír*, 90, č. 3, s. 160–164.

POURTAHMASI, K., LOTFIOMRAN, N., BRÄUNING, A., PARSAPAJOUH, D. (2011): Tree-ring width and vessel characteristics of oriental beech (*Fagus orientalis*) along an altitudinal gradient in the Caspian forests, Northern Iran. *IAWA journal*, 32, č. 4, s. 461–473.

PRACIAK, A., PASIECZNIK, N., SHEIL, D., VAN HEIST, M., SASSEN, M., CORREIA, C. S., DIXON, C., FYSON, G., RUSHFORD, K., TEELING, C. (2013): The CABI encyclopedia of forest trees. CABI, Oxfordshire, 536 s.

PROCHÁZKA, S. a kol. (1994): Morfologie a fyziologie rostlin. Vysoká škola zemědělská v Brně, Brno, 222 s.

QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Československá akademie věd – Geografický ústav Brno, Brno, 72 s.

SHUMILOV, O. I., KASATKINA, E. A., MIELIKAINEN, K., TIMONEN, M., KANATJEV, A. G. (2011): Palaeovolcanos, Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years. International Journal of Environmental Research, 5, č. 4, s. 855–864.

SCHARNWEBER, T., MANTHEY, M., WILMKING, M. (2013): Differential radial growth patterns between beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on periodically waterlogged soils. Tree Physiology, 33, č. 4, s. 425–437.

SCHULTZ, J., NEUWIRTH, B., WINIGER, M., LÖFFLER, J. (2009): Negative pointer years from Central European tree-rings caused by circulation patterns. TRACE, 7, s. 78–84.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1983): Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Paul Haupt, Bern, 234 s.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1996): Tree rings and environment: dendroecology. Paul Haupt, Bern, 609 s.

SCHWEINGRUBER, F. H., BÖRNER, A., SCHULZE, E.-D. (2008): Atlas of woody plant stems: evolution, structure and environmental modifications. Springer, Berlin, 229 s.

SCHWEINGRUBER, F. H., ECKSTEIN, D., SERRE-BACHET, F., BRÄKER, O. U. (1990): Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. Dendrochronologia, 8, s. 9–38.

SIMON, P., LENA, M. (2016): Radial growth response of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) trees to climate in Ljubljana, Slovenia. Urban Forestry & Urban Greening, 18, s. 110–116.

SPEER, J. H. (2010): Fundamentals of Tree-Ring Research. The University of Arizona Press, Tucson, 333 s.

STOKES, M. A., SMILEY, T. L. (1996): An introduction to tree-ring dating. University of Arizona Press, Tucson, 73 s.

SUTTON, A., TARDIF, J. (2005): Distribution and anatomical characteristics of white rings in *Populus tremuloides*. *Iawa Journal*, 26, č. 2, s. 221–238.

ŠAFÁŘ, J. (ed) a kol. (2003): Olomoucko, svazek VI. In: Mackovčín, P., Sedláček, M. (eds): Chráněná území ČR. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 456 s.

ŠILHÁN, K. (2013): Základy dendrogeomorfologie. Katedra fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity v Ostravě, Ostrava, 114 s.

ŠKODOVÁ, M., MAZÚREK, J. (2012): Chránené územia Slovenska. Vysokoškolské skriptá. Katedra geografie, geológie a krajinnej ekológie, Fakulta prírodných vied Univerzity Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, 117 s.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. (2002): Stavba dřeva. Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Brno, 187 s.

ŠTĚPÁNEK, P. a kol. (2019): Očekávané klimatické podmínky v České republice: část I. Změna základních parametrů. Ústav výzkumu globální změny, Akademie věd České republiky, Brno, 71 s.

TINNER, W., AMMANN, B. (2005): Long-term responses of mountain ecosystems to environmental changes: Resilience, adjustment, and vulnerability. In: Huber, U. M., Bugmann, H. K. M., Reasoner, M. A. (eds): *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*. Springer, Dordrecht, s. 133–143.

TRENBERTH, K. E. (1984): Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics. Part I: Autocorrelations. *Monthly Weather Review*, 112, č. 12, s. 2359–2368.

TRNKA, M., BRÁZDIL, R., DUBROVSKÝ, M., SEMERÁDOVÁ, D., ŠTĚPÁNEK, P., DOBROVOLNÝ, P., MOŽNÝ, M., EITZINGER, J., MÁLEK, J., FORMAYER, H. (2011): A 200-year climate record in Central Europe: implications for agriculture. *Agronomy for sustainable development*, 31, č. 4, s. 631–641.

ULIČNÝ, D., LAURIN, J. (2007): Nové poznatky v sedimentární geologii západní části české křídly. In: Bauer P., Kopecký V., Šmucar J. (eds): *Labské pískovce – historie, příroda a ochrana území*. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Správa CHKO Labské pískovce, Děčín, s. 30–34.

ÚRADNÍČEK, L., MADĚRA, P., TICHÁ, S., KOBLÍŽEK, J. (2001): Dřeviny České republiky. *Matice lesnická, Písek*, 333 s.

VEJPUSTKOVÁ, M., ČIHÁK, T. (2019): Climate response of Douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in Central Europe. *Forests*, 10, č. 2, s. 97.

VEJPUSTKOVÁ, M. a kol. (2019): Monitoring zdravotního stavu lesa v České republice v rámci programu ICP Forests a navazujících projektů: data do roku 2018. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Praha, 92 s.

VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J. I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23, č. 7, s. 1696–1718.

WAITO, J., CONCIATORI, F., TARDIF, J. C. (2013): Frost rings and white earlywood rings in *Picea mariana* trees from the boreal plains, central Canada. *IAWA journal*, 34, č. 1, s. 71–87.

WANG, L., PAYETTE, S., BÉGIN, Y. (2002): Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, č. 3, s. 477.

WARING, R. H., SCHROEDER, P. E., OREN, R. (1982): Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Canadian Journal of Forest Research*, 12, č. 3, s. 556–560.

WATSON, R. T. a kol. (2005): *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, Washington, DC, 137 s.

WEBER, P., BUGMANN, H., PLUESS, A. R., WALTHERT, L., RIGLING, A. (2013): Drought response and changing mean sensitivity of European beech close to the dry distribution limit. *Trees*, 27, č. 1, s. 171–181.

WHITE, P. S. (1979): Pattern, Process, and Natural Disturbance in Vegetation. *Botanical Review*, 45, č. 3, s. 229–299.

WILMKING, M., HALLINGER, M., VAN BOGAERT, R., KYNCL, T., BABST, F., HAHNE, W., JUDAY, G. P., DE LUIS, M., NOVAK, K., VÖLLM, C. (2012): Continuously missing outer rings in woody plants at their distributional margins. *Dendrochronologia*, 30, č. 3, s. 213–222.

YANOSKY, T. M., JARRETT, R. D. (2002): Dendrochronologic evidence for the frequency and magnitude of paleofloods. In: House, P. K., Webb, R. H., Baker, V. R.,

Levish, D. R. (eds): Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology. Amer Geophysical Union, Washington, DC, 5, s. 77–89.

ZAHRADNICKÝ, J., MACKOVČIN, P. (eds) a kol. (2004): Plzeňsko a Karlovarsko, svazek XI. In: Mackovčín, P., Sedláček, M. (eds): Chráněná území ČR. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 588 s.

ZHANG, Z., MURTAGH, F., VAN POUCKE, S., LIN, S., LAN, P. (2017): Hierarchical cluster analysis in clinical research with heterogeneous study population: Highlighting its visualization with R. Annals of Translational Medicine, 5, č. 4, s. 75–86.

ZVÁRA, K. (2013): Základy statistiky v prostředí R. První vydání. Karolinum, Praha, 259 s.

## 10.2. Datové, mapové, internetové a jiné zdroje

AOPK (2020): PrirodniPomery/Klima (MapServer): Klimatické oblasti. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, dostupné na: <<https://gis.nature.cz/arcgis/rest/services/PrirodniPomery/Klima/MapServer>> [cit. 06. 07. 2020].

ArcČR 500 (2016): Digitální geografická databáze 1 : 500 000, verze 3.3. ARCDATA PRAHA, s.r.o., ZÚ, ČSÚ, dostupné na: <<https://www.arccdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500>> [cit. 26. 06. 2020]

BEGUERÍA, S., VICENTE-SERRANO, S. M. (2017): Package 'SPEI': Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. The Comprehensive R Archive Network, dostupné na: <<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf>> [cit. 13. 07. 2020].

BUNN, A. a kol. (2020): Package 'dplR': A Dendrochronology Program Library in R. The Comprehensive R Archive Network, dostupné na: <<https://cran.r-project.org/web/packages/dplR/dplR.pdf>> [cit. 14. 07. 2020].

CROWSON, H. M. (2020): Variable selection procedures in R (using 'olsrr' package). Multivariate statistics for the real world, dostupné na: <<https://drive.google.com/file/d/1F5u6rVb0Iym7UH0eeYscEKWLNOAc3Gmj/view>> [cit. 20. 07. 2020].

ČHMÚ (2020a): Praha Klementinum. Český hydrometeorologický ústav, dostupné na: <<http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/praha-klementinum>> [cit. 16. 05. 2020].

ČHMÚ (2020b): Typizace povětrnostních situací pro území České republiky. Český hydrometeorologický ústav, dostupné na: <<http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/typizace-povetnostnich-situaci>> [cit. 13. 08. 2020].

ESRI (2020): ArcMap. Environmental Systems Research Institute, Inc., dostupné na: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>> [cit. 20. 07. 2020].

GISAT (2007): Data ke stažení: digitální model terénu. Gisat s.r.o., dostupné na: <<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/data-ke-stazeni>> [cit. 06. 07. 2020].

GKÚ Bratislava (2020): Územné a správne usporiadanie – Tretia úroveň generalizácie. Geodetický a kartografický ústav Bratislava, dostupné na: <[https://www.geoportal.sk/sk/zbqis\\_smd/na-stiahnutie/](https://www.geoportal.sk/sk/zbqis_smd/na-stiahnutie/)> [cit. 26. 06. 2020].

GRYC, V., VAVRČÍK, H. (2014): Struktura dřeva významných dřevin rostoucích na území České republiky (poster). Ústav nauky o dřevě, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, dostupné na: <[https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Stavba\\_dreva/postery/SDR-mak-mik.pdf](https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Stavba_dreva/postery/SDR-mak-mik.pdf)> [cit. 23. 03. 2020].

HEBBALI, A. (2020): Package 'olsrr': Tools for Building OLS Regression Models. The Comprehensive R Archive Network, dostupné na: <<https://cran.r-project.org/web/packages/olsrr/olsrr.pdf>> [cit. 20. 07. 2020].

Microsoft (2020): Microsoft Excel: tabulkový software. Microsoft, dostupné na: <<https://www.microsoft.com/cs-cz/microsoft-365/excel>> [cit. 14. 07. 2020].

NP Slovenský raj (2020): Příroda: Lesy Slovenského raja (poster). Národní park Slovenský raj, dostupné na: <<http://npslovenskyraj.sopsr.sk/priroda/>> [cit. 07. 07. 2020].

NP Velká Fatra (2020): Příroda: Geomorfologie (poster). Národní park Velká Fatra, dostupné na: <<http://npvelkafatra.sopsr.sk/priroda/>> [cit. 07. 07. 2020].

R Core Team (2019): A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, dostupné na: <<https://www.r-project.org/>> [cit. 13. 07. 2020].

Regent Instruments (2019): WinDENDRO™: An Image Analysis System for Tree-rings Analysis. Regent Instruments Inc. – Image Analysis for Plant Science, dostupné na: <[https://regentinstruments.com/assets/windendro\\_about.html](https://regentinstruments.com/assets/windendro_about.html)> [cit. 11. 07. 2020].

SCIEM (2018): PAST – Personal Analysis System for Treering research. SCIEM – Scientific Engineering & Manufacturing, dostupné na: <<http://www.sciem.com/products/past/>> [cit. 12. 07. 2020].

SULLIVAN, J. (1993). Pinus sylvestris. In: Fire Effects Information System. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory, dostupné na: <<https://www.fs.fed.us/database/feis/plants/tree/pinsyl/all.html>> [cit. 25. 06. 2020].

VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M., VAN DER MAATEN, E. (2016): Package ‘pointRes’: Analyzing Pointer Years and Components of Resilience. The Comprehensive R Archive Network, dostupné na: <<https://cran.r-project.org/web/packages/pointRes/pointRes.pdf>> [cit. 22. 07. 2020].

ZANG, C., BIONDI, F. (2019): Package ‘treeclim’: Numerical Calibration of Proxy-Climate Relationships. The Comprehensive R Archive Network, dostupné na: <<https://cran.r-project.org/web/packages/treeclim/treeclim.pdf>> [cit. 28. 07. 2020].

ŽÁČEK, V. (1994): Databáze významných geologických lokalit: Střela (877). Česká geologická služba, dostupné na: <<http://lokality.geology.cz/877>> [cit. 04. 07. 2020]

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Klimadiagramy zkoumaných lokalit.

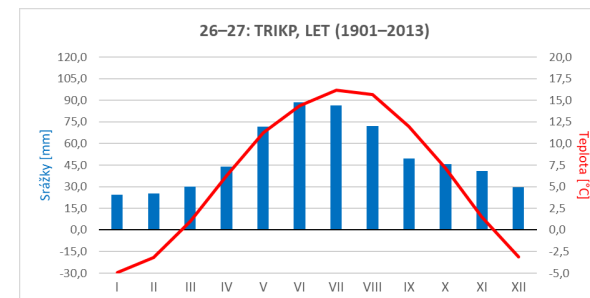
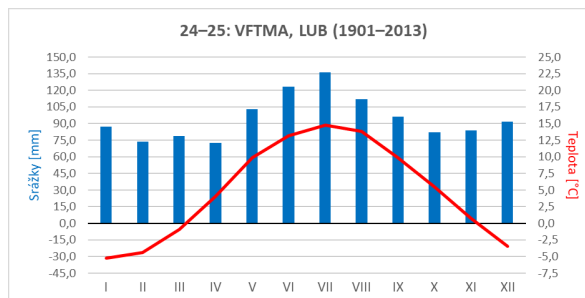
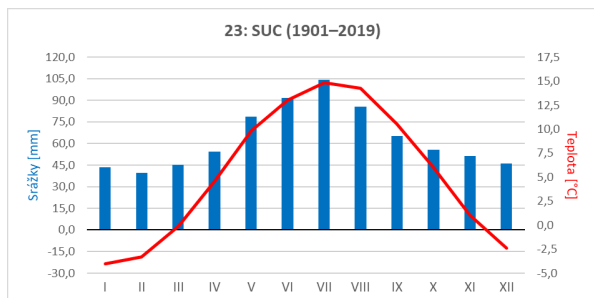
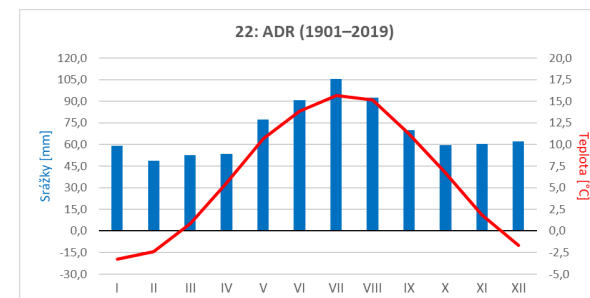
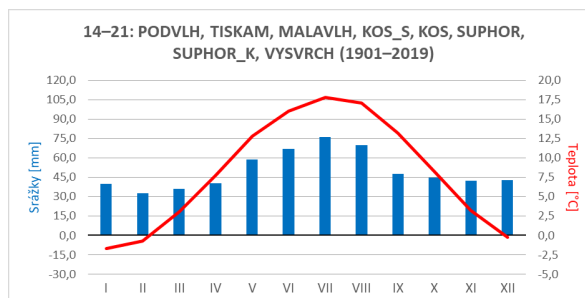
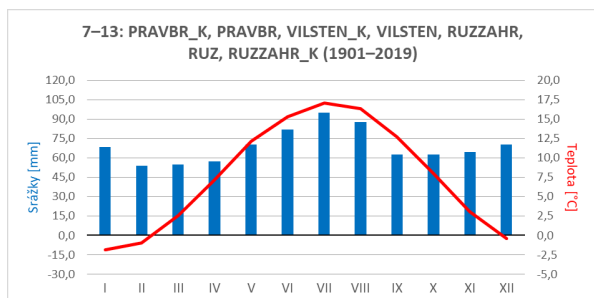
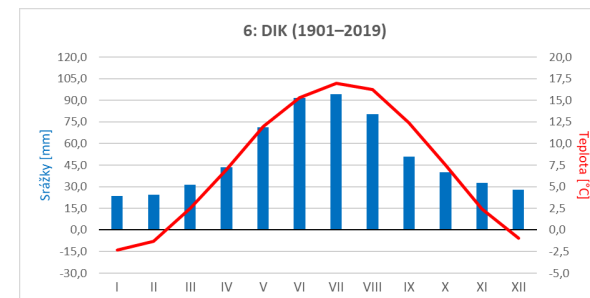
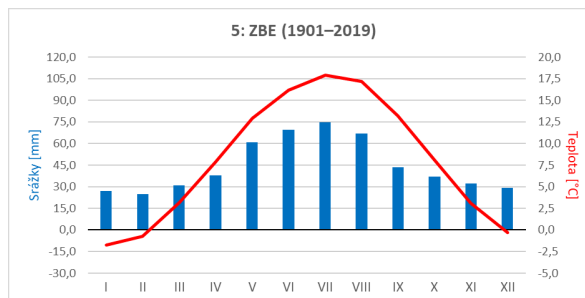
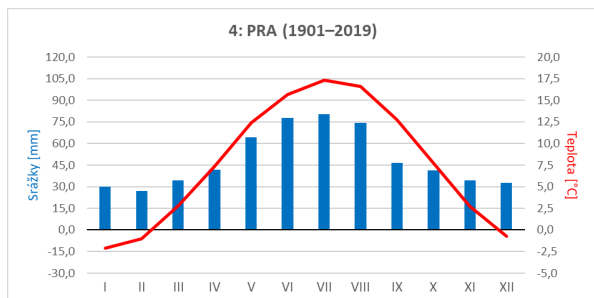
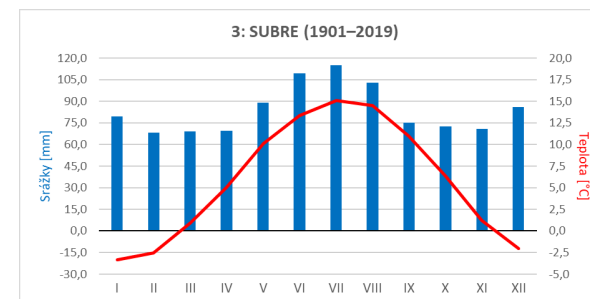
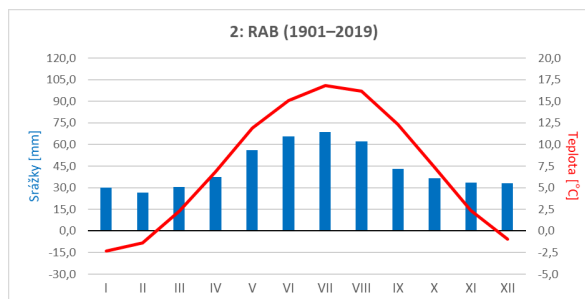
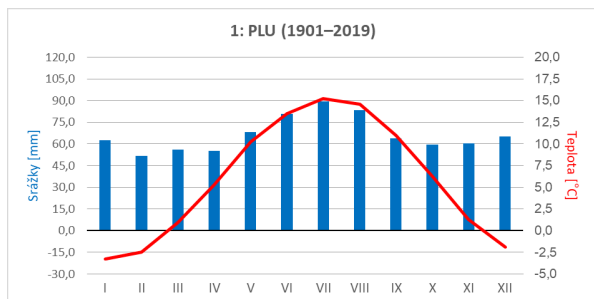
Příloha 2: Odchyly chodu srážek a teplot ve třech nejextrémnějších dendrochronologických letech (dle C values) daných lokalit od klimatického normálu.

Příloha 3: Dendrogramy nejextrémnějších růstových let vzniklé hierarchickou klastrovou analýzou.

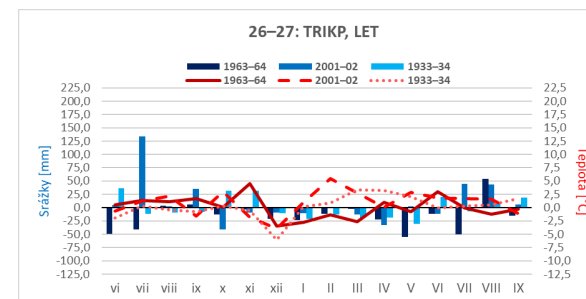
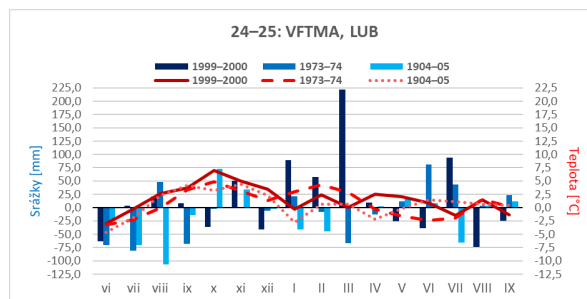
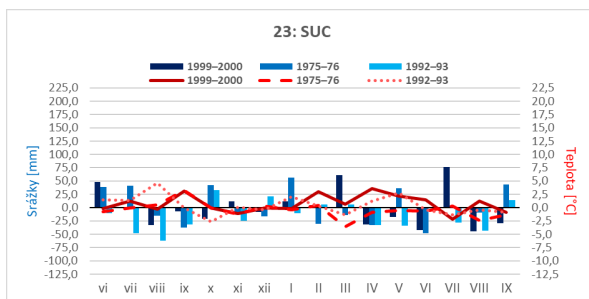
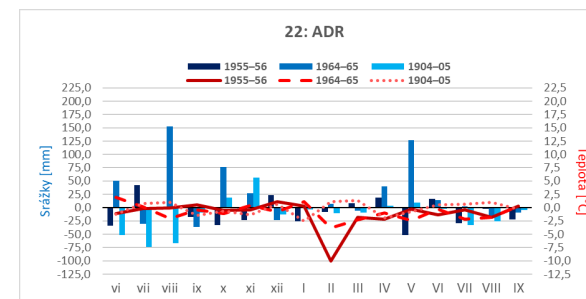
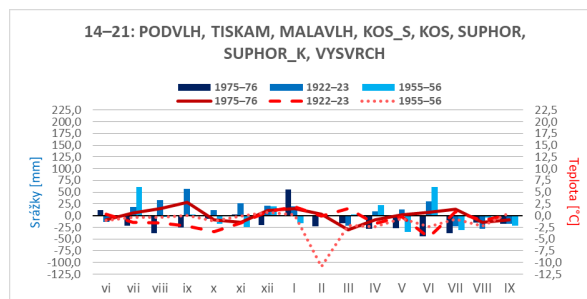
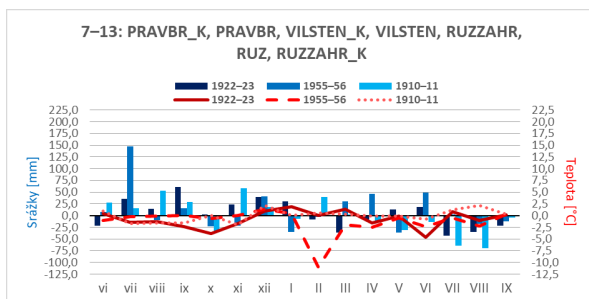
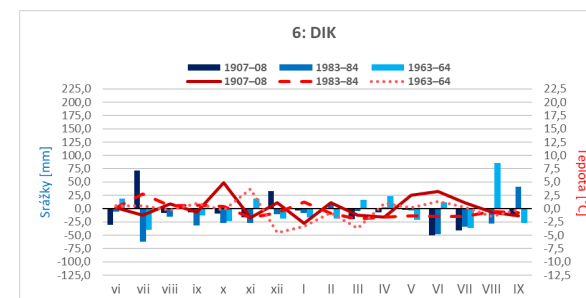
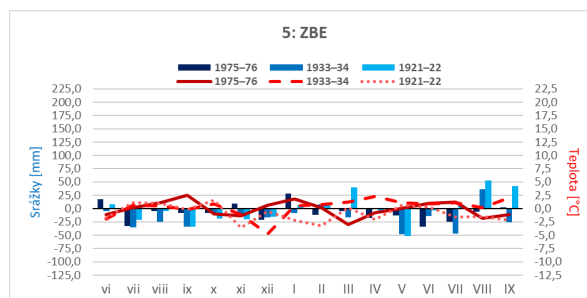
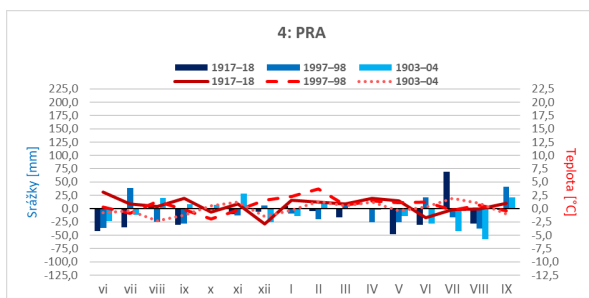
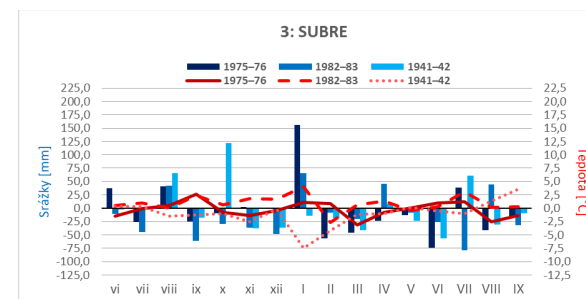
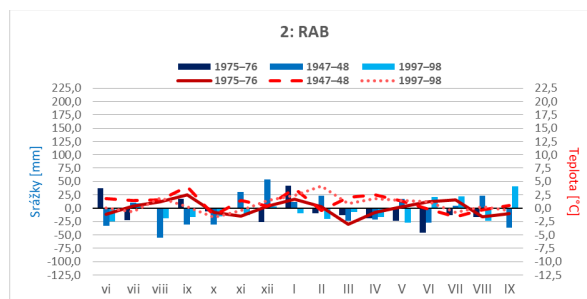
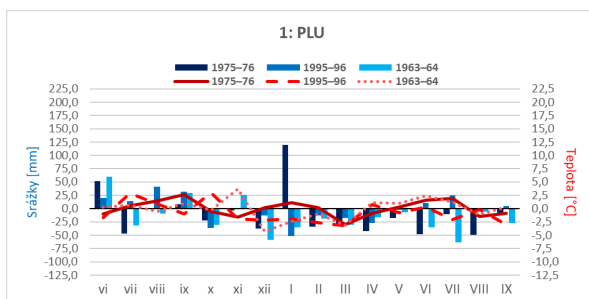
Příloha 4: Prostorová regrese C values ve vybraných letech.



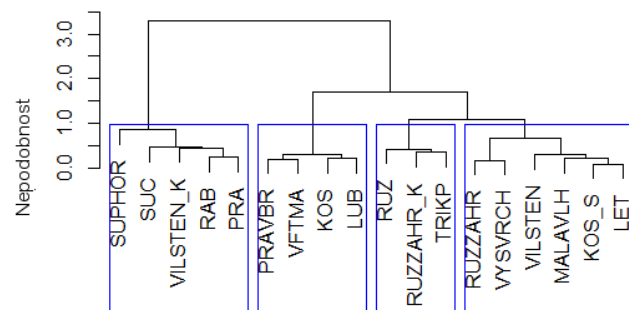
## Příloha 1: Klimadiagramy zkoumaných lokalit (v závorce uvedeno časové období vstupních dat).



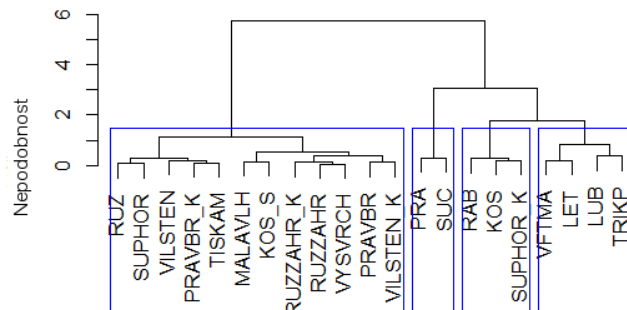
**Příloha 2:** Odchytky chodu srážek a teplot ve třech nejextrémnějších dendrochronologických letech (dle C values) daných lokalit od klimatického normálu.



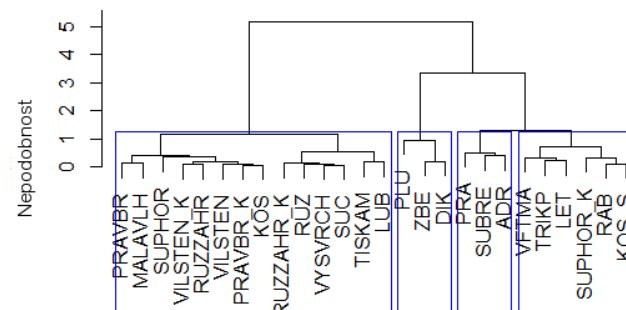
**Příloha 3:** Dendrogramy nejextrémnějších růstových let vzniklé hierarchickou klastrovou analýzou (modře jsou vyznačené shluky lokalit při rozdělení do 4 tříd).



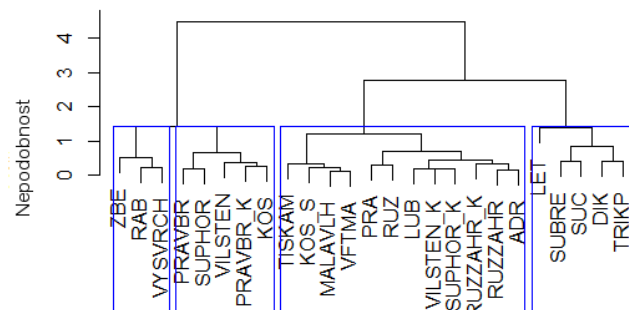
1865



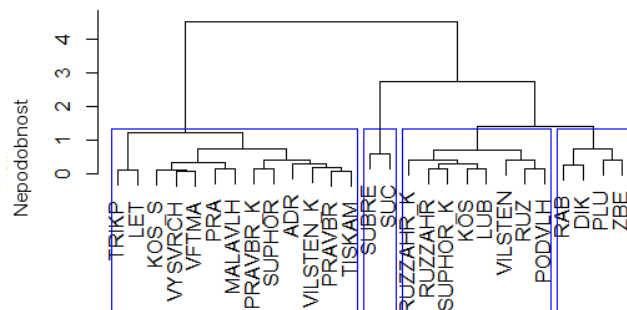
1877



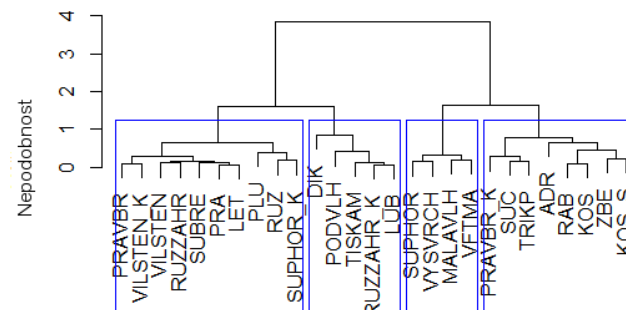
1889



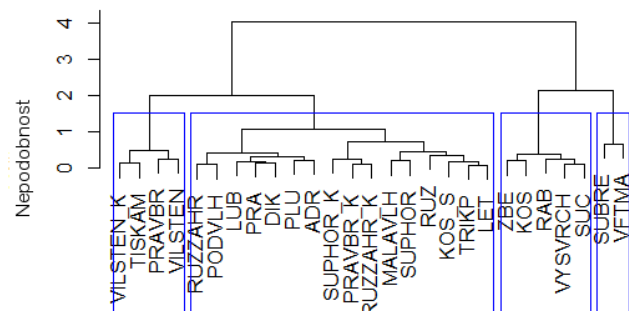
1893



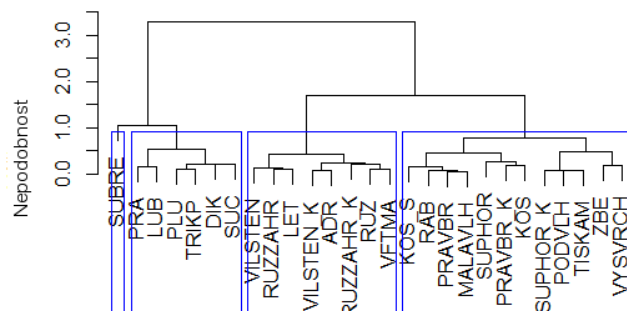
1904



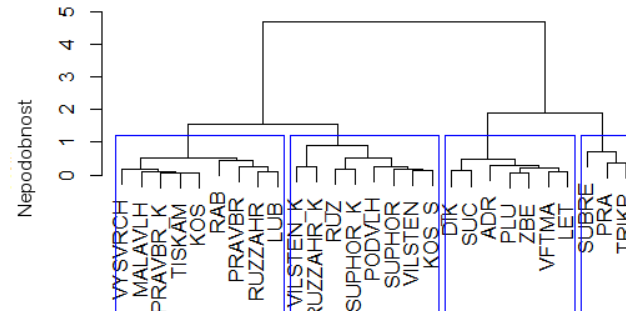
1905



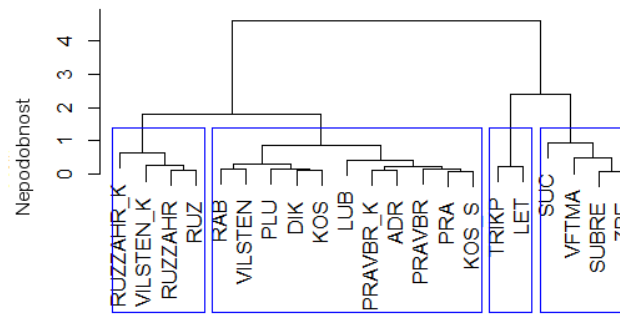
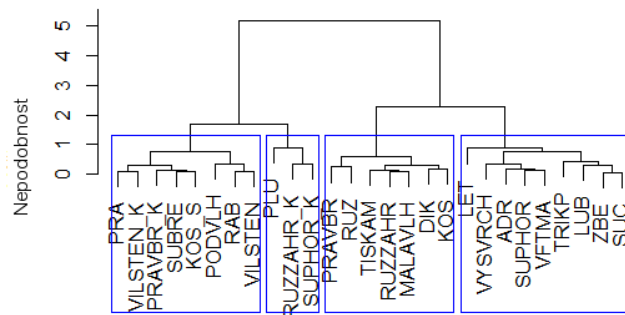
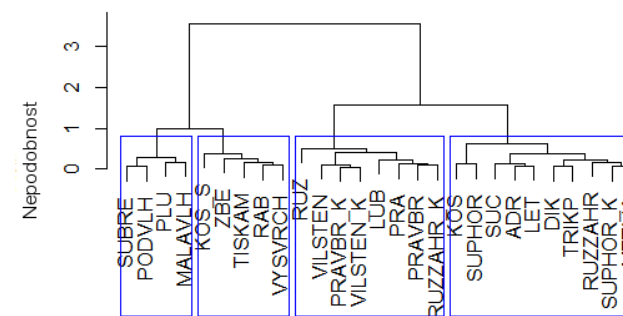
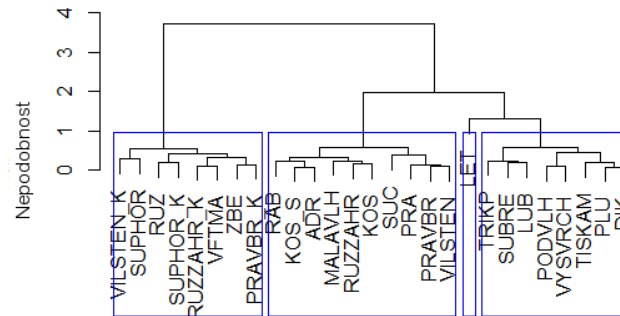
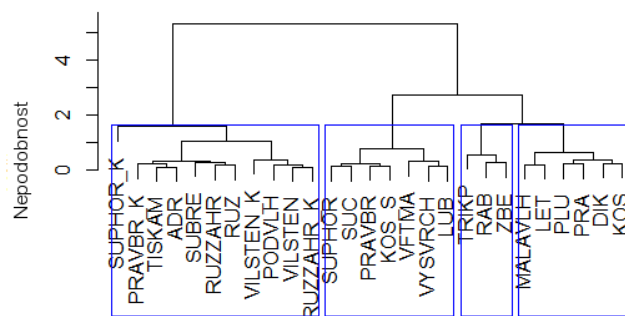
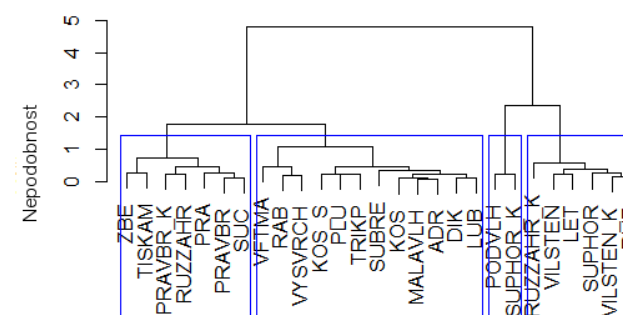
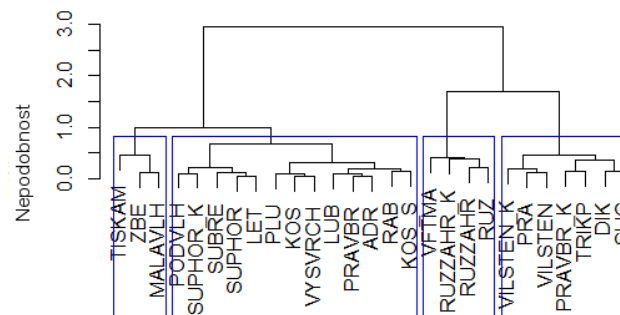
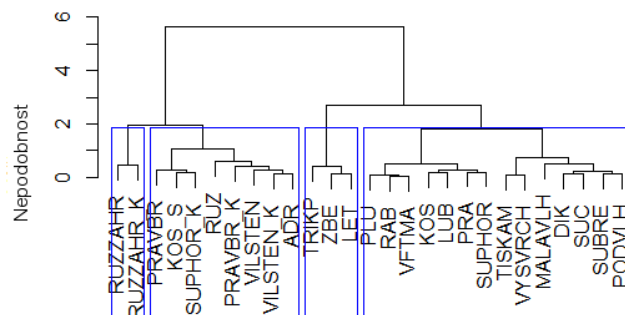
1911



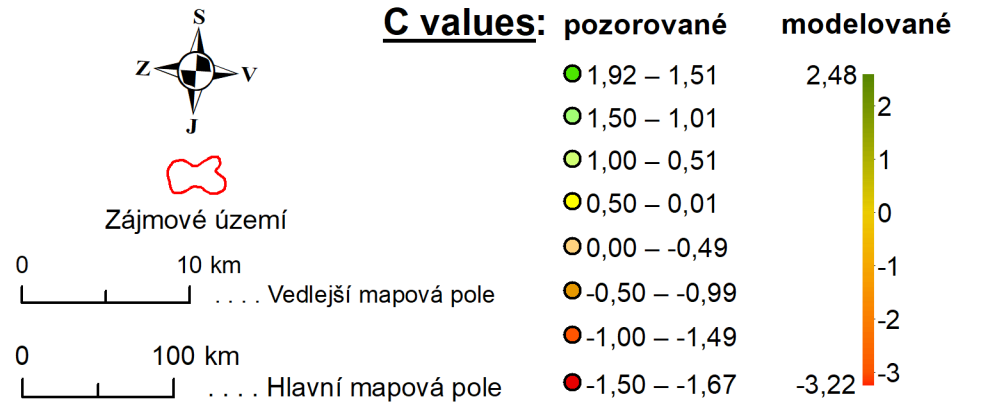
1922



1923



**Příloha 4:** Prostorová regrese C values (Cv) na základě severnosti (Sev), východnosti (Vých) a/nebo nadmořské výšce (NadmV) ve vybraných letech.



Adj.  $R^2 = 0,60$   
 $p = 0,00003$

**1872**

$$Cv = -33,52 + 0,6767 \times Sev$$

Adj.  $R^2 = 0,61$   
 $p = 0,0002$

**1877**

$$Cv = 33,10 + -0,6509 \times Sev + -0,1290 \times Vých + 0,0016 \times NadmV$$

Adj.  $R^2 = 0,53$   
 $p = 0,0003$

**1880**

$$Cv = 2,81 + -0,1987 \times Vých + 0,0008 \times NadmV$$

Adj.  $R^2 = 0,50$   
 $p = 0,0001$

**1882**

$$Cv = 4,16 + -0,2197 \times Vých$$

Adj.  $R^2 = 0,44$   
 $p = 0,0006$

**1892**

$$Cv = -28,25 + 0,5434 \times Sev + 0,0743 \times Vých$$

Adj.  $R^2 = 0,54$   
 $p = 0,0002$

**1896**

$$Cv = 36,79 + -0,6580 \times Sev + -0,2236 \times Vých + -0,0012 \times NadmV$$

Adj.  $R^2 = 0,46$   
 $p = 0,0002$

**1914**

$$Cv = 18,52 + -0,4033 \times Sev + 0,1227 \times Vých$$

Adj.  $R^2 = 0,46$   
 $p = 0,0001$

**1922**

$$Cv = -1,30 + 0,0010 \times NadmV$$

Adj.  $R^2 = 0,50$   
 $p = 0,0001$

**1904**

$$Cv = 1,06 + -0,1742 \times Vých + 0,0016 \times NadmV$$

Adj.  $R^2 = 0,58$   
 $p = 0,00001$

**1918**

$$Cv = -31,29 + 0,6088 \times Sev + 0,0414 \times Vých$$

Adj.  $R^2 = 0,69$   
 $p = 0,000001$

**1923**

$$Cv = 18,09 + -0,3680 \times Sev + -0,0675 \times Vých + 0,0010 \times NadmV$$



Adj.  $R^2 = 0,50$   
 $p = 0,0001$

**1924**

$Cv = 14,42 + -0,2995 \times Sev + 0,0006 \times NadmV$

Adj.  $R^2 = 0,75$   
 $p = 0,0000000003$

**1950**

$Cv = -41,21 + 0,8233 \times Sev$

Adj.  $R^2 = 0,40$   
 $p = 0,0008$

**1954**

$Cv = 10,67 + -0,2501 \times Sev + 0,1006 \times Vých$

Adj.  $R^2 = 0,46$   
 $p = 0,0002$

**1940**

$Cv = 29,06 + -0,5790 \times Sev + -0,0008 \times NadmV$

Adj.  $R^2 = 0,43$   
 $p = 0,0001$

**1952**

$Cv = -18,27 + 0,3580 \times Sev$

Adj.  $R^2 = 0,53$   
 $p = 0,00001$

**1962**

$Cv = -3,16 + 0,1843 \times Vých$

Adj.  $R^2 = 0,42$   
 $p = 0,0002$

**1974**

$$Cv = -22,96 + 0,4526 \times Sev$$

Adj.  $R^2 = 0,61$   
 $p = 0,000005$

**2002**

$$Cv = -9,37 + 0,2495 \times Sev + \\ -0,1883 \times Vých$$

Adj.  $R^2 = 0,64$   
 $p = 0,0009$

**2009**

$$Cv = 1,90 + -0,1753 \times Vých + \\ 0,0014 \times NadmV$$

Adj.  $R^2 = 0,69$   
 $p = 0,0000003$

**1991**

$$Cv = 13,31 + -0,3122 \times Sev + \\ 0,1412 \times Vých$$

Adj.  $R^2 = 0,55$   
 $p = 0,0003$

**2006**

$$Cv = 11,06 + -0,2669 \times Sev + \\ 0,1097 \times Vých$$



Zájmové území

0 10 km

... Vedlejší mapová pole

0 100 km

... Hlavní mapová pole

**C values:** pozorované modelované

● 1,92 – 1,51

● 1,50 – 1,01

● 1,00 – 0,51

● 0,50 – 0,01

○ 0,00 – -0,49

● -0,50 – -0,99

● -1,00 – -1,49

● -1,50 – -1,67

2,48

2

1

0

-1

-2

-3

-3,22